COLLOQUE

LA TECHNOLOGIE DES MICRO-ONDES DANS L'AGRO-ALIMENTAIRE

Le 4 décembre 1985

Hôtel Bonaventure
Hilton International,
Montréal

CONSEIL DES DENRÉES ALIMENTAIRES
DU QUÉBEC

Québec

88-00771/

COLLOQUE

"LA TECHNOLOGIE DES MICRO-ONDES DANS L'AGRO-ALIMENTAIRE"

LE 4 DÉCEMBRE 1985

HÔTEL BONAVENTURE
HILTON INTERNATIONAL,
MONTRÉAL

PAR
LE CONSEIL DES
DENRÉES ALIMENTAIRES
DU QUÉBEC

ISBN 2-551-06670-0
Dépôt légal - 4e trimestre
Bibliothèque nationale du Québec

COMITÉ EXÉCUTIF DU C.D.A.Q.

CONSTANTINEAU, Richard
Président-directeur général, Pomexpan, Longueuil
(Président)

DUFOUR, Jean-Claude
Professeur, Département d'économie rurale, Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, université Laval, Sainte-Foy
(Vice-président)

GIROUX, Roger
Directeur technique, Division lait de transformation, Agropur, coopérative agro-alimentaire, Granby
(Vice-président)

GRÉGOIRE, Yvan
Catelli Limitée, Direction de la recherche, Montréal
(Vice-président)

CHEZ, Daniel
Directeur de la Coordination scientifique et technique, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Québec
(Vice-président)

HÉBERT, Jean
Directeur de la Recherche, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Sainte-Foy
(Directeur)

GUERCH, Abdesslam
Secrétaire du Conseil des denrées alimentaires du Québec, Direction de la coordination scientifique et technique, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Québec
(Secrétaire)

COMITÉ D'ORGANISATION DU COLLOQUE

DUFOUR, Jean-Claude
Professeur, Département d'économie rurale, université Laval, Sainte-Foy
(Président)

AKYEL, Cevdet
Professeur, École polytechnique, Université de Montréal, Génie électrique, Division micro-ondes, Montréal

ANCELLIN, Christian
Cordon Bleu, Montréal

GUAY, Paul-Émile
Attaché commercial agro-alimentaire, Vice-présidence, Commercialisation, Hydro-Québec, Montréal

PAQUIN, Réal
Physicien, Laboratoires d'expertises et d'analyses alimentaires, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Québec

SCOTT-THIBODEAU, Lise
Agronome, Raymond, Chabot, Martin, Paré et Associés, Montréal

GUERCH, Abdesslam
Secrétaire C.D.A.Q., Direction de la coordination scientifique et technique, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Québec
(Secrétaire)

ANIMATRICE

SCOTT-THIBODEAU, Lise
Agronome, Raymond, Chabot, Martin, Paré et Associés, Montréal

PRÉSIDENT DU COLLOQUE

DUFOUR, Jean-Claude
Professeur, Département d'économie rural, université Laval, Sainte-Foy

CONFÉRENCIER(ÈRE)S

AKYEL, Cevdet
Professeur, École polytechnique, Université de Montréal, Génie électrique, Division micro-ondes, Montréal

BELLAVOINE, Robert
Directeur, Société S.F.A.M.U., Plombière-les-Bains, France

DECAREAU, Robert V.
Technologiste alimentaire, Laboratoires Natik, Amherst, New Hampshire, U.S.A.

KLEIN, Barbara P.
Professeure et directrice du Département de nutrition, Université de l'Illinois, Urbana, U.S.A.

MEISEL, Nicholas
P.D.G., Industries Micro-ondes internationales (I.M.I.), Épone, France

STUCHLY, Maria A.
Chercheure, Bureau de la radio-protection, Santé et Bien-être social Canada, Ottawa, Ontario

RESPONSABLE DE L'INSCRIPTION ET SECRÉTARIAT

RUEL, Carole
Agente de secrétariat, Direction de la coordination scientifique et technique, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Québec

COMITÉ D'ACCUEIL

BÉLANGER, Paul
Technicien en administration, Direction de la coordination scientifique et technique, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Québec

LEDUC, Lise
Agente de secrétariat, Direction du développement industriel, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Montréal

LABELLE, Lise
Agente de secrétariat, Service du développement des marchés intérieurs, Direction du développement commercial, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Montréal

TABLE DES MATIÈRES

Page

M. Cevdet Akyel (École polytechnique)
"L'industrie agro-alimentaire et les micro-ondes" 1

M. Nicolas Meisel (Industrie micro-ondes internationales)
"Applications des micro-ondes à la décongélation et au séchage industriel et études comparatives du point de vue qualitatif, énergétique et financier" .. 20

Mme Barbara P. Klein (Université de l'Illinois)
"Effet de la cuisson et du traitement aux micro-ondes sur la qualité des aliments" 72

M. Robert Bellavoine (Société S.F.A.M.O.)
"Application des micro-ondes dans le domaine industriel et agro-alimentaire -- Équipement existant et évolution future" 99

Mme Maria Stuchly (Santé et Bien-être social Canada)
"Les règles de sécurité applicables à l'utilisation de la technologie des micro-ondes dans l'industrie alimentaire" 106

M. Robert Decareau (Laboratoires Natik)
"Micro-ondes: perspectives de développement" 134

Commanditaire 162

Remerciements 163

Dr Cevdet Akyel, ingénieur

Département de génie électrique
École polytechnique de Montréal

L'INDUSTRIE AGRO-ALIMENTAIRE ET LES MICRO-ONDES

INTRODUCTION

Un projet d'utilisation de l'énergie micro-ondes dans un procédé industriel agro-alimentaire doit évidemment être précédé d'une étude technique et économique.

Dans cet exposé, on examine les facteurs influant sur l'utilisation des hyperfréquences ou micro-ondes dans le but de répondre à la question: "Que doit faire un industriel qui projette d'utiliser les micro-ondes comme source d'énergie?"

Étude préliminaire

La caractérisation des matériaux au point de vue "constantes diélectriques" et "pertes diélectriques" forme le premier pas dans n'importe quelle approche de chauffage ou de séchage par micro-ondes dans le domaine agro-alimentaire.

Certains matériaux présentent des particularités qu'il faut identifier dès le départ. Des matériaux avec faibles pertes diélectriques en début du précédé limitent tout de suite l'utilisation de l'énergie micro-ondes. Même dans ce cas, on peut imaginer un chauffage ou un séchage traditionnels pour démarrer le procédé si les chances de continuer par chauffage micro-onde dans des conditions de température ou d'humidité sont plus favorables pour la période plus avancée de l'application d'énergie.

Ceci nous amène donc à distinguer deux étapes dans les études préliminaires: les mesures de pertes diélectriques et la simulation du procédé.

a) Mesure des pertes

Le chauffage par micro-ondes étant influencé en premier lieu par l'évolution des pertes diélectriques tout au long du procédé, il convient de connaître clairement la variation de ce facteur ($\varepsilon_r = \tan\delta\varepsilon'_r$) en fonction de la température, de l'humidité, de la concentration ou de tout changement physico-chimique dans l'évolution du procédé. Alors, le tableau du procédé étant clarifié, il

devient évident à quel moment il faut injecter les micro-ondes pour obtenir un rapport optimal énergie/temps.

D'autre part, il ne faut pas oublier que pour certaines raisons (meilleure qualité du produit, un plafond de température limite, etc.) un chauffage par micro-ondes bien que moins efficace peut paraître plus attrayant. La contre-partie de cette remarque existe aussi. Un chauffage très efficace au point de vue transfert d'énergie au sein du matériau peut avoir des résultats néfastes au point de vue qualité s'il y a un emballement thermique avec l'application de l'énergie micro-ondes. L'apparition de points extrêmement chauds (hot points) peut détériorer la qualité des produits.

Ces inconvénients ou ces avantages des micro-ondes peuvent être mieux mis en valeur par une étude thermodynamique complète des matériaux utilisés. La conductivité thermique du matériau joue un rôle aussi important que les pertes diélectriques, car une fois la chaleur engendrée au sein du matériau, si elle n'est pas dissipée par conduction, rayonnement ou transformation chimique, il y a possibilité qu'elle produise des points chauds comme il a été mentionné précédemment. Le chauffage par micro-ondes devient attrayant pour les matériaux thermiquement isolants donc difficiles à chauffer par procédés traditionnels. Si la limite supérieure de la température n'a aucune importance ou n'affecte pas la qualité du produit final, l'utilisation de l'énergie micro-ondes peut se révéler très prometteuse.

En Amérique du Nord, il existe des fréquences allouées pour les applications des micro-ondes autres que les communications (industrielle, scientifique et médicale = ISM) qui sont principalement 27, 40, 915 et 2 450 MHz. Les appareils et les sources sont disponibles à ces fréquences dites ISM.

Il suffit donc de concentrer les mesures de la permittivité (constante diélectrique et perte diélectrique) autour de ces fréquences ISM. Ceci facilite le choix de la fréquence qui influence énormément les coûts inhérents à une application industrielle.

b) Simulation du procédé

Avec les paramètres et les variantes du procédé retenues en (a), une simulation sur ordinateur peut être envisagée pour divers choix d'équipement (fréquence, puissance, etc.) et d'étapes de chauffage par micro-ondes (début, milieu, fin) en faisant ressortir le comportement thermique du procédé. Ce programme peut également tenir compte de la forme des applicateurs, de la logistique d'utilisation des micro-ondes ou de tout autre facteur influant.

Avant d'investir des sommes importantes, il est essentiel d'obtenir une image complète de l'application projetée avec toutes ses variantes afin de minimiser les erreurs. On évitera ainsi le fameux: "essayons, on verra ...". Évidemment, n'importe quelle simulation, quel que soit son degré de perfection, ne peut refléter toute la com-

plexité d'une application réelle. Par conséquent, il est très utile de procéder à des essais à échelle réduite en vue de confirmer les résultats de la simulation.

INTERACTION ONDE-MATIÈRE

Une onde électromagnétique plane qui rencontre la matière réagit suivant trois sortes de processus bien définis: absorption et/ou transmission ou réflexion. Dans les proportions qui varient d'un matériau à l'autre, on a souvent affaire à une combinaison de ces trois phénomènes. D'une façon générale, on peut parler, comme en optique, des matériaux réfléchissants, transparents ou opaques aux micro-ondes.

L'apparition de la chaleur est spécifique au phénomène d'absorption qui peut être plus ou moins fort suivant les pertes diélectriques, la conductivité ionique, etc.

Lorsqu'on parle du chauffage diélectrique, on fait souvent allusion à la polarisation des molécules qui suit le rythme imposé par le changement du champ électrique directement relié à la fréquence du signal générateur. D'autre part, il ne faut pas négliger la production de chaleur par effet de conductivité dans un milieu où la concentration ionique devient importante (produits semi-liquides riches en sel, etc. de l'industrie agro-alimentaire).

L'apport de chaleur par pertes diélectriques est régi par l'équation suivante:

$$\frac{dP}{dv} = 2\pi\varepsilon_0 f E^2 \acute{\varepsilon}_r \ tg\delta \quad (watt/m^3)$$

Dans ce processus de chauffage, il faut également tenir compte de l'affaiblissement des champs électromagnétiques au fur et à mesure que les micro-ondes pénètrent la matière. L'épaisseur à laquelle la force de l'onde tombe à 1/e de sa valeur (37%) s'appelle la profondeur de pénétration et est donnée par la formule suivante:

$$d = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{2}{\acute{\varepsilon}_r \left(\left[1 + \tan^2 \delta \right]^{1/2} - 1 \right)} \right)^{1/2}$$

où λ désigne la longueur d'onde.

ÉTUDE DE FAISABILITÉ

L'étude de faisabilité d'un procédé où les micro-ondes interviennent comme source d'énergie doit essentiellement comprendre une étude technique et une étude économique. Les principaux paramètres qui régissent la faisabilité d'un projet d'implantation sont:

- Réduction du temps de production
- Réduction d'encombrement
- Amélioration de la productivité
- Économie de matières premières
- Amélioration de la qualité
- Coût des équipements

Les études techniques sont basées sur l'apport calorifique et la distribution du champ électrique responsable du chauffage.

L'étude de faisabilité technique comporte plusieurs facettes. Les problèmes se posent au niveau de la puissance requise, de la disponibilité des sources, des applicateurs, du choix d'une source à grande capacité ou d'un certain nombre de sources de petite taille distribuées tout au long du procédé.

La puissance requise est relativement facile à calculer dans le cas où on connaît les paramètres thermodynamiques du procédé. Cependant, l'utilisation de cette énergie dans un applicateur peut poser des problèmes concernant le champ électrique maximal permis pour éviter les risques de claquage.

Les dimensions et la nature des matériaux mis en jeu, le milieu ambiant, le pourcentage d'humidité ou tout autre facteur influant doivent être évalués avec précision afin d'éviter les risques de claquage. Ces données permettront de choisir le type de source à utiliser.

Parfois, il est plus commode de diviser les sources et de les distribuer physiquement tout au long du procédé. Ceci ajoute de la flexibilité et améliore la fiabilité en cas de panne d'une source. Par contre, le facteur de coût doit être pris en considération. Une seule source de grande capacité peut coûter moins cher qu'un ensemble de sources équivalentes au point de vue puissance. La disponibilité

des sources, les délais de livraison peuvent également influencer la décision finale.

Le rendement des sources utilisées dans les applications industrielles est maintenant de l'ordre de 70% à 80%. À 915 MHz des sources de 50 kW et de 100 kW sont disponibles. À 2 450 MHz on trouve sur le marché des sources de 2,5, 5,50 et 100 kW. Les sources modulaires offrent l'avantage évident de bien se prêter à une expansion ou à une augmentation de production.

Généralement, on ne pense pas à un remplacement intégral des sources d'énergie traditionnelles par les micro-ondes. Souvent, ce sont des solutions mixtes qui sont optimales. De plus, les micro-ondes n'ont pas nécesairement le même attrait au début et à la fin d'un procédé. En effet, les procédés peuvent se diviser en deux classes selon les coûts des différents types d'énergie en début ou à la fin du procédé.

L'applicateur d'énergie constitue un des éléments les plus importants d'un projet d'implantation. Dans la bande de fréquence RF (27 MHz), l'applicateur compte pour 40% de l'investissement et la source 60%. Dans les bandes UHF (915 et 2 450 MHz), le générateur constitue 40% des coûts d'investissement et l'applicateur 60%. Selon le procédé, on distingue des applicateurs destinés à la production par lots soit des cavités monomodes ou multimodes (four) ou des applicateurs à radiation par des cornets ou autres types d'antennes. Pour la production en continu, on utilise des applicateurs multimodes, à méandres ou à structures lentes.

L'implantation doit se faire en deux phases:

a) Sur modèles réduits avec des instruments qui vont mesurer l'ensemble des paramètres qui doivent être contrôlés (température, humidité, réaction chimique, vitesse, puissance, etc.). Ces essais ont pour but d'optimiser le couplage énergétique entre l'applicateur et le produit pour augmenter le couplage ou pour amorcer le procédé d'absorption micro-ondes.

b) Sur grandeur nature avec autant d'instruments qu'en a) puisqu'il faut contrôler encore tous les paramètres si on veut optimiser le procédé réel.

APERÇU D'APPLICATIONS DANS L'INDUSTRIE AGRO-ALIMENTAIRE

On doit d'abord noter que le four micro-ondes domestique est mieux connu et plus utilisé que le four micro-ondes industriel. Un facteur qui limite l'expansion rapide des procédés industriels utilisant l'énergie micro-ondes est le coût élevé du four industriel en comparaison avec le coût du four domestique. En effet, le four domestique de 750 W coûte environ 0,80$/watt (dollar U.S.); un four industriel de 50 kW coûte plus de 3,00$/watt. En plus de cette importante différence de prix, il y a d'autres facteurs qui ralentissent la pénétration de cette nouvelle technologie dans les industries.

- Les enjeux économiques sont plus importants et les procédés techniques plus complexes.

- Il existe sur le marché peu de sources micro-ondes qui rencontrent complètement les besoins industriels: faible coût d'investissement et de fonctionnement.

- Il est souvent nécessaire de concevoir un nouvel applicateur pour chaque produit industriel.

- Le bon fonctionnement d'un four micro-ondes industriel exige une compétence technique qui dépasse la formation actuelle des cadres industriels. (D'après une étude récente Jolly (1979) portant sur 200 ingénieurs de la côte Ouest des États-Unis, 49% des personnes interrogées n'avaient aucune connaissance des applications industrielles des micro-ondes, 43% avaient lu des publications techniques sur la question, 3% avaient fait des essais et 5% avaient supervisé une installation des fours microondes. En outre, 14% des industries employant les personnes interrogées possédaient un four à micro-ondes).

Malgré la présence de facteurs qui retardent la pénétration des technologies micro-ondes dans le milieu industriel, il existe déjà une forte activité dans divers secteurs industriels.

DOMAINE D'APPLICATIONS

1. Cuisson ou chauffage
   1.1 La viande - viande de boucherie - volaille
   1.2 Les produits laitiers: pasteurisation, stérilisation

1.3 Les poissons et crustacés

1.4 Les légumes verts et les pommes de terre

1.5 Le riz

1.6 Graines diverses

2. Décongélation

2.1 Amélioration de la qualité bactériologique

2.2 Suppression de l'oxydation

2.3 Diminution des exsudats

2.4 Amélioration des qualités organoleptiques et nutritionnelles

3. Séchage industriel

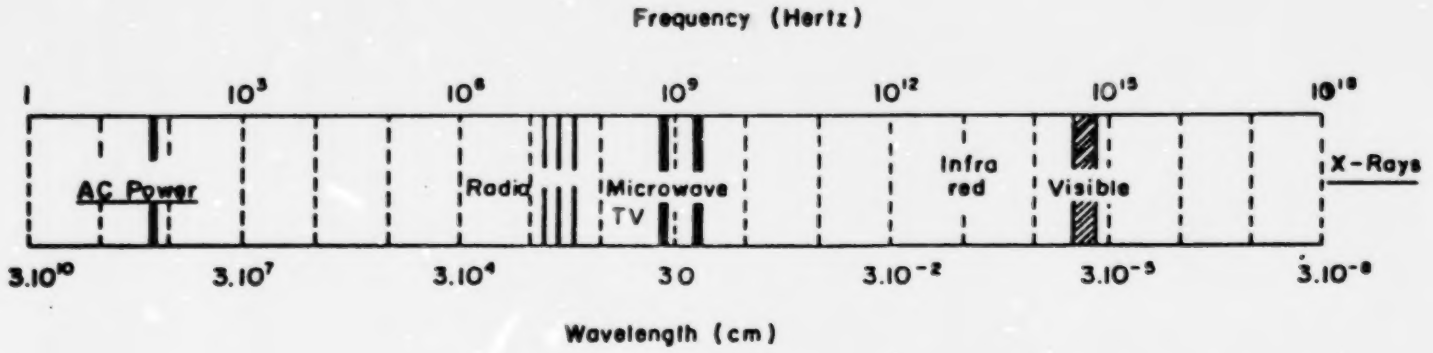
3.1 Pâtes alimentaires

3.2 Fruits

3.3 Légumes

CONCLUSION

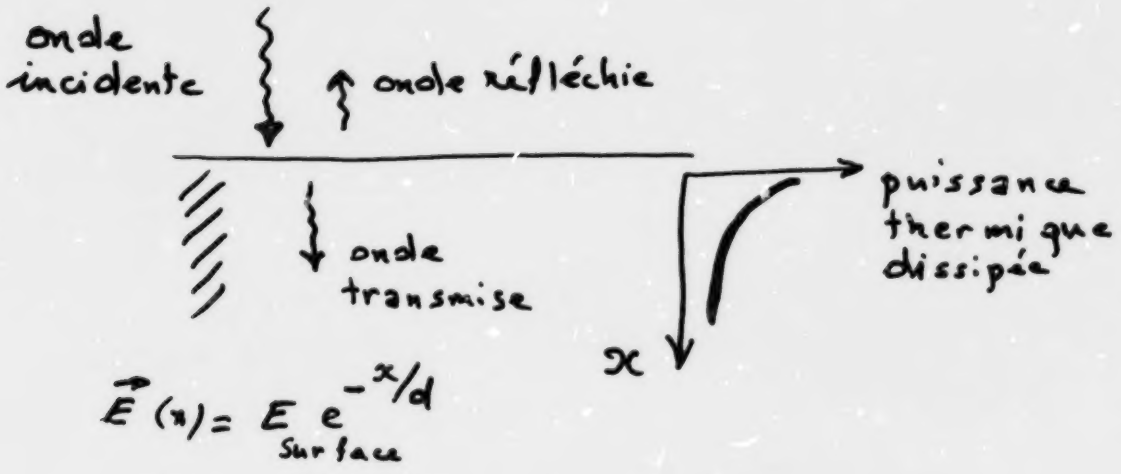
L'utilisation de l'énergie micro-ondes dans les applications industrielles peut être rentable si on en fait l'implantation après des études économiques et techniques soignées.



The Electromagnetic Spectrum.

Référence: R. Schiffmann,"Basic Principles of Microwave"
IMPI Publication, Volume 5, 1975

- Microwave Ovens and Frozen Foods
Make Cents -



$$\vec{E}(x) = E_{surface}\, e^{-x/d}$$

Profondeur de pénétration:

$$d = \frac{\lambda}{2\pi}\sqrt{\frac{2}{\varepsilon'_r\left(\sqrt{1+tg^2\delta}-1\right)}}$$

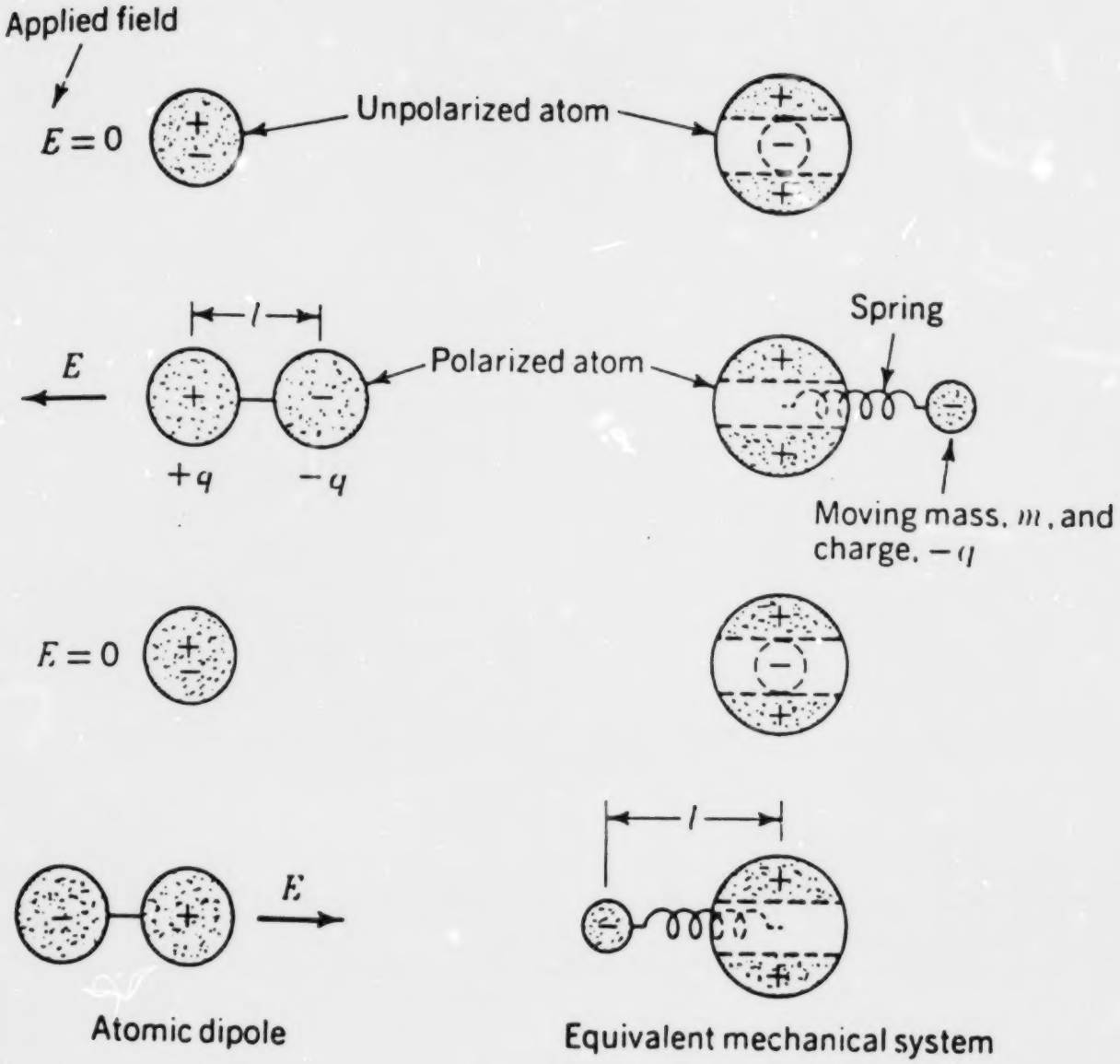
Avec $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon_0\left(\varepsilon'_r - j\varepsilon''_r\right)$

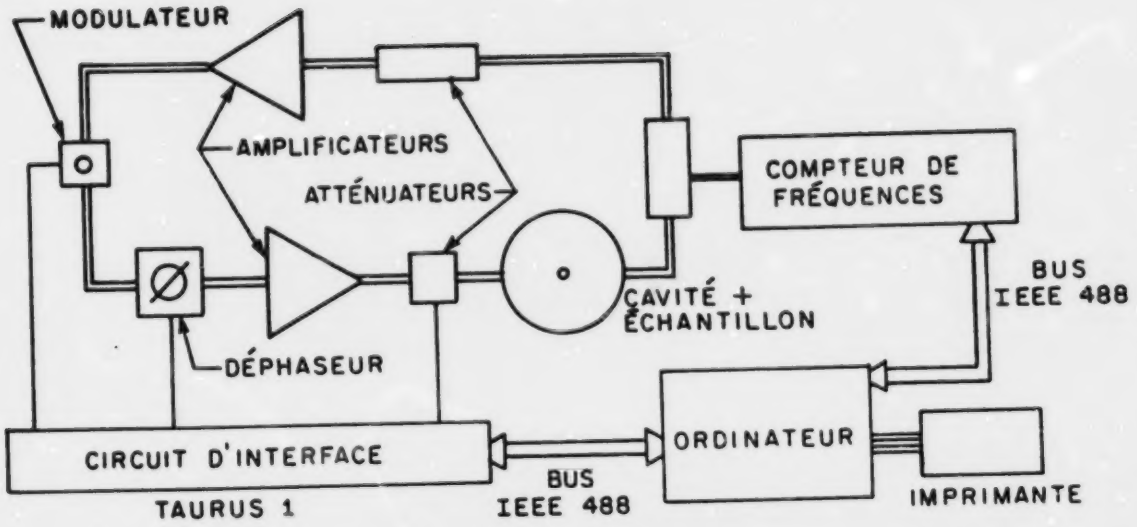
$$tg\,\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$

Puissance dissipée par unité de volume:

$$\boxed{\frac{dP}{dv} = 2\pi\,\varepsilon_0\, f\, E^2\, \varepsilon_r\, tg\,\delta}$$

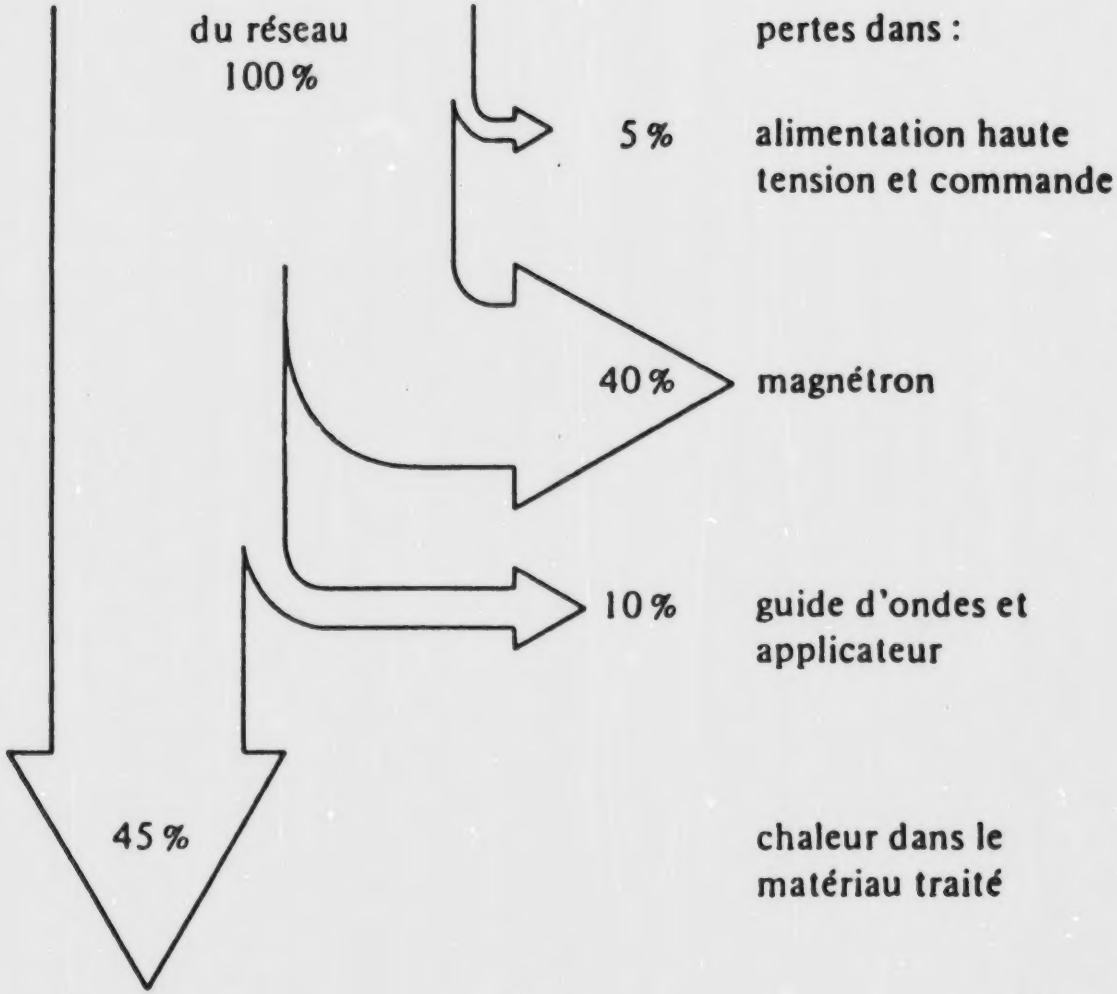
Référence: J.D. Kraus "Electromagnetics", McGraw-Hill.





SYSTÈME DE MESURE ACTIVE
POUR DÉTERMINER ε' ET ε''

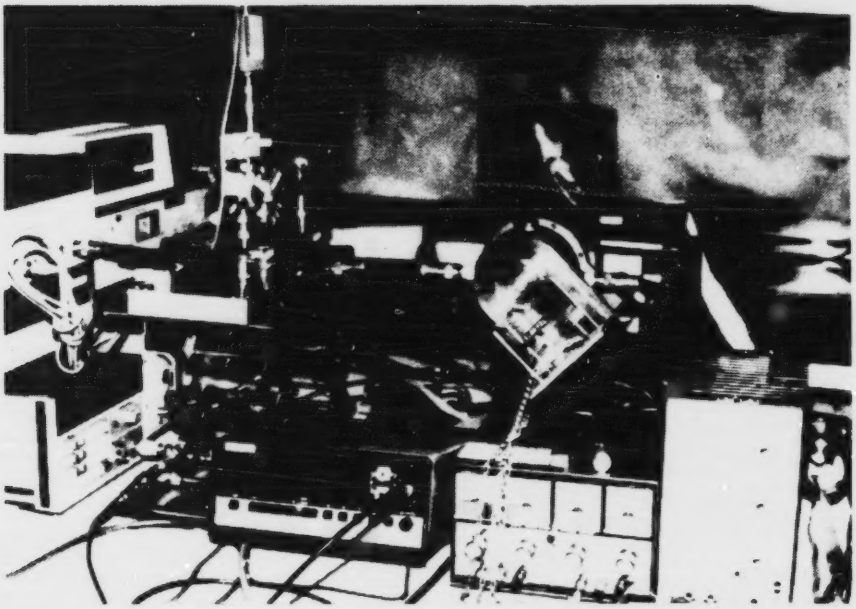
Référence: C. AKYEL, Génie Électrique
École Polytechnique de Montréal.

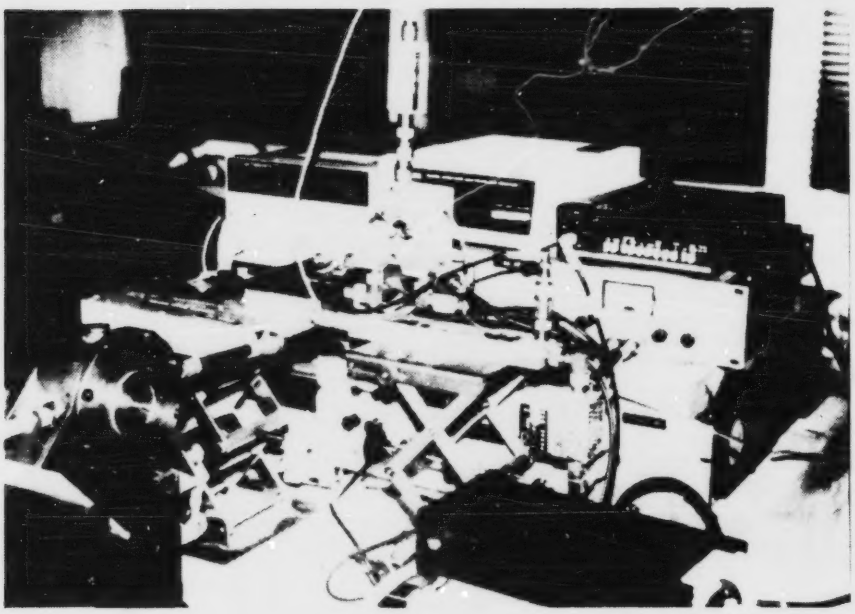


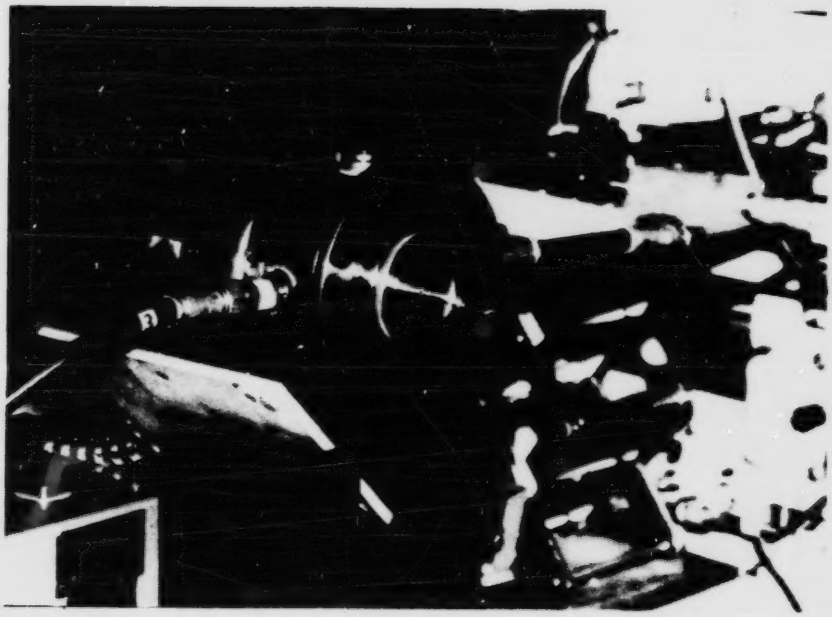
Bilan énergétique du chauffage par microondes.

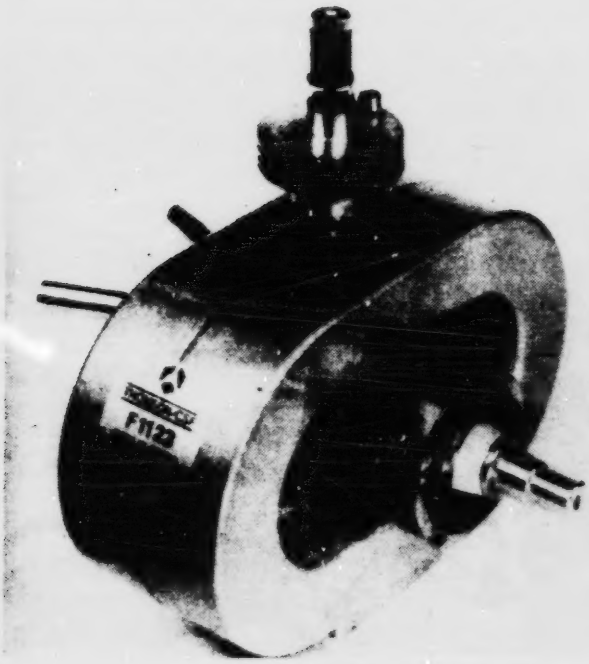
Référence: F. Gardiol, Traité d'Electricité, Volume XIII Hyperfréquences, Éditions Georgi.

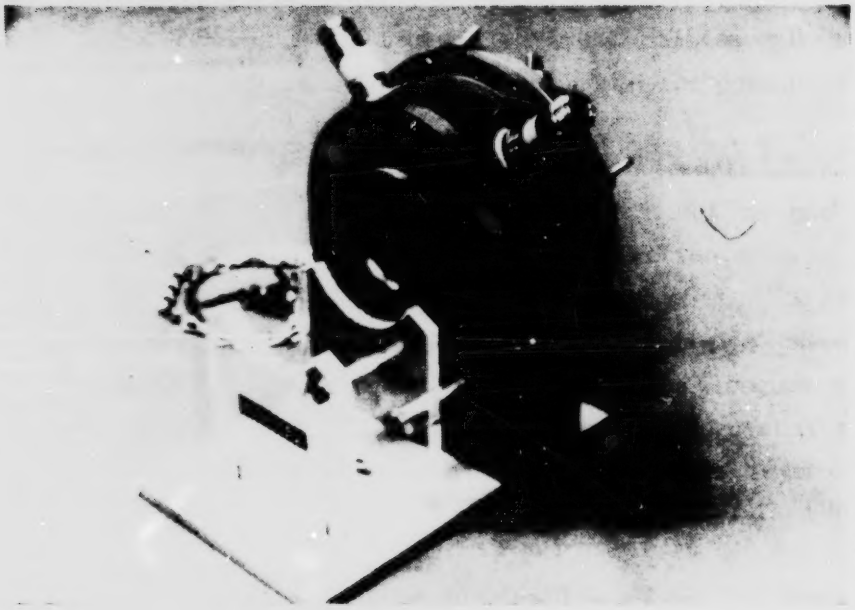
Différents appareils de recherche sur les micro-ondes.

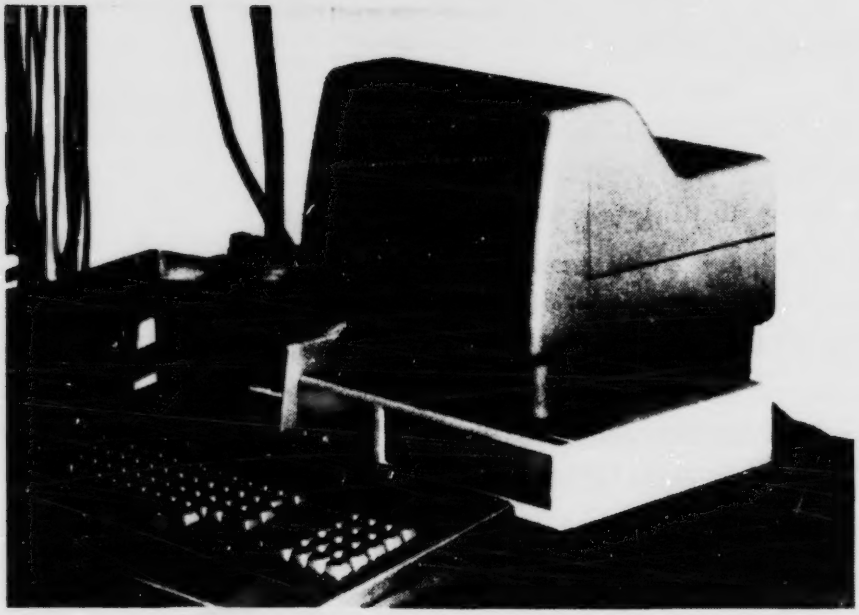







F1123





M. Nicolas Meisel

Directeur général
Industrie micro-ondes internationales

APPLICATIONS DES MICRO-ONDES A LA DÉCONGÉLATION ET AU SÉCHAGE INDUSTRIEL ET ÉTUDES COMPARATIVES DU POINT DE VUE QUALITATIF, ÉNERGÉTIQUE ET FINANCIER

Monsieur le Ministre, Mesdames, Messieurs,

Avant de poursuivre le remarquable exposé du professeur Akyel en vous démontrant que la technique des micro-ondes, loin d'être restée l'apanage de quelques visionnaires ou chercheurs courageux, est devenue un outil industriel appréciable et apprécié, je tiens à remercier, comme il se doit,

le gouvernement du Québec, M. le Ministre de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, ainsi que l'École polytechnique et toutes les personnalités qui se sont donné tant de peine pour rendre ce séminaire possible.

Vous entretenir aujourd'hui d'un sujet qui a rempli 25 années de mon existence est non seulemnt pour moi un grand honneur, mais aussi un plaisir et une satisfaction.

Oui, Mesdames et Messieurs, je ressens ma présence devant vous aujourd'hui comme la consécration de ces longues et parfois dures années de défrichement de champs nouveaux et étendus - ceux des applications industrielles des rayonnements non ionisants.

Et je ne peux et ne dois omettre de souligner combien important a été le rôle du Canada dans la promotion des micro-ondes dans les domaines industriel, scientifique et médical, par la création à Edmonton et le soutien pendant de longues années par l'Alberta et le Conseil national de recherche de l'International Micro-wave Power Institute, dont j'ai eu l'honneur d'être le vice-président pour l'Europe pendant huit ans, ainsi que de sa revue.

Crédit soit donc donné ici aux Canadiens Wayne Tinga, Geff Voss, dont le dévouement à notre cause a permis l'essor de l'I.M.P.I., mais aussi aux Américains Jim Jolly, Bill Brown, John Gerling, Bob Schiffmann, et tant d'autres, pour leurs efforts généreux en faveur du progrès, de la diffusion et de la progression de cette technologie. Également au professeur R.G. Bosisio de votre École polytechnique, à M. A.K.

Hamid et à leurs nombreux collaborateurs, dont les remarquables travaux sont connus et appréciés de tous.

La légende veut - et elle est, hélas, souvent l'image du réel - que les Français inventent et que les Allemands et les Anglo-saxons réalisent. Cette légende étant un peu vieille, elle omet de mentionner les Japonais dont l'esprit et la vocation industrielle font qu'ils se sont taillé la part du lion dans le marché des fours à micro-ondes domestiques.

C'est en voulant démentir cette légende, que ma société a été parmi les premières sur le marché mondial à développer, fabriquer et vendre, des équipements industriels.

Je vous parle donc aujourd'hui d'expérience directe et vécue pour la plupart du temps. Je prendrai comme première application la décongélation puisque, dans l'ordre chronologique de nos activités, elle a été notre première réussite.

LA DÉCONGÉLATION DES DENRÉES ALIMENTAIRES

La production saisonnière, parfois intensive et localisée des denrées, a fait naître le besoin de leur conservation pour leur permettre de franchir le temps et les distances sans altération.

Un des moyens les plus répandus de conservation est celui par le froid. Les industriels peuvent ainsi disposer à

longueur d'année de produits ayant subi un minimum d'altération. L'évolution des techniques ainsi que des connaissances permettent une maîtrise de plus en plus grande des phénomènes physiques, chimiques ainsi que biologiques, qui accompagnent la congélation. La qualité des produits congelés ne cesse de s'améliorer. Mais alors que la quantité des études et recherches faites sur la congélation est immense, l'importance des travaux sur la décongélation est nettement moindre: pourtant, ces dernières années, les utilisateurs de matières premières conservées par le froid ont commencé à s'apercevoir combien la décongélation sauvage est source de pertes tant en qualité qu'en quantité.

En France, la législation, dès 1974, a réglementé la décongélation des matières d'origine animale et ceci d'une façon assez stricte. Voilà ce que dit l'article 20 de l'Arrêté du 26 juin 1974, réglementant les conditions de congélation, de conservation et de décongélation des denrées animales et d'origine animale, paru au J.O. de la République Française du 31 juillet 1974:

"Les méthodes de décongélation pourront faire l'objet d'arrêté du ministre de l'Agriculture et, s'il s'agit de produits de la mer, du ministre de l'Agriculture et du ministre chargé des pêches maritimes. En l'absence de méthode autorisée, la décongélation des denrées animales ou d'origine animale doit être effectuée à l'abri des souillures, dans une enceinte à une température comprise entre 0°C et + 4°C."

J'ai le plaisir de vous informer que par lettre du 11 juillet 1985, les Services vétérinaires français ont homologué les tunnels à micro-ondes de notre fabrication comme représentant, sous certaines conditions, une méthode autorisée.

Alors que la recommandation d'une décongélation à + 4°C ne paraît pas être la solution la meilleure dans de nombreux cas, la loi a toutefois le très grand mérite d'avoir sensibilisé la profession sur les dangers et les pertes qu'une mauvaise décongélation provoque.

En effet, tant les phénomènes physiques que ceux chimiques, biologiques et enzymatiques lorsque mal maîtrisés, peuvent être sources de grands ennuis:

Phénomène physiques (voir acétate 1)

Peu d'industriels savent que la conductivité thermique de l'eau est quatre fois inférieure à celle de la glace. Il en résulte qu'il faut pratiquement quatre fois plus de temps pour décongeler que pour congeler, lorsque les procédés classiques de transfert de chaleur sont utilisés.

Lors de la décongélation, les cristaux formés au moment de la congélation fondent. Une grande partie de cette eau est réabsorbée par les tissus, mais une partie non négligeable sera perdue sous forme d'exsudats. L'exsudation non maîtrisée est nuisible pour trois raisons:

- La perte de masse, pouvant atteindre 10% pour les viandes désossées, qui est une perte sèche, rarement récupérable.

- La perte de qualité organoleptique et nutritionnelle car des sels et protéines solubles sont entraînés par l'eau non réabsorbée.

- L'augmentation du danger de pollution, la présence des exsudats en surface des viandes créant un milieu très propice à la multiplication des germes.

L'importance de la perte par exsudation dépend de très nombreux facteurs dont la constance dans la température d'entreposage ainsi que la durée de celui-ci en sont d'importants.

En général, une congélation rapide, une température constante et une décongélation rapide donnent les meilleurs résultats. Ceci peut s'expliquer par la traversée plus courte dans les deux sens, de la zone de température où les cristaux de glace ont tendance à croître, et en ce faisant, à déchirer les tissus. De même, les variations de la température d'entreposage affectent l'équilibre établi et deviennent source d'altération physique et chimique.

Phénomènes chimiques

Ce sont les solutions les plus concentrées qui fondent les premières. Il en résulte une altération des substances protéiques qui sont en contact direct avec ces solutions. D'où l'intérêt d'une décongélation aussi rapide que possible, limitant dans le temps, ce contact.

Phénomènes biologiques et enzymatiques

Au fur et à mesure que la température s'élève, l'activité microbienne et enzymatique reprend. Lorsque l'apport de chaleur se fait par conduction de la surface vers le coeur et que le gradient de température est important, ces activités peuvent devenir dangereuses.

Comme il ressort de l'acétate 2, ce n'est qu'à - 18°C que toute multiplication microbienne s'arrête alors que les bacilles ou les coques (bactéries) sont neutralisés dès - 10°C.

Les germes pathogènes sont neutralisés vers + 3°C, mais recommencent à se multiplier au-dessus de 3,3°C et deviennent toxiques à partir de + 10°C pour le Clostridium botulinum et à + 18°C pour les staphylocoques. Il est donc évident qu'une décongélation hygiénique ne peut se faire qu'en maîtrisant parfaitement la température, surtout en surface, des produits à décongeler.

La décongélation en chambre froide à + 4°C

Elle apparaît de premier abord de loin la plus simple. Pourtant, pour ceux qui l'utilisent, que de problèmes!

La durée de décongélation varie selon les dimensions des produits mais oscille entre 24 à 36 heures pour les blocs pour atteindre trois à cinq jours pour les quartiers, d'où:

- volumes considérables des chambres, donc investissements importants tant en bâtiments qu'en marchandises;

- manque total de souplesse dans l'organisation du travail donc programmation difficile;

- main-d'oeuvre importante de manutention souvent nécessaire pour déplacer les palettes tant pour tenir compte de la mauvaise répartition des températures ambiantes que pour assurer "première entrée-première sortie";

- impossibilité d'assurer un travail en chaîne à partir du congelé;

- nécessité de tenir compte des week-ends et jours de fêtes;

- grande difficulté de nettoyage.

Les cellules de décongélation

En France, la Compagnie générale des entrepôts frigorifiques a mis au point une cellule de décongélation en parallèle avec ses installations de congélation. Son système est également autorisé par les Services vétérinaires, mais uniquement lorsque ces cellules sont utilisées par la compagnie elle-même.

Ces courbes sont celles de l'air ambiant, de la surface de la viande et du coeur d'un quartier arrière de boeuf (acétate 3).

Remarquer avec quel soin celle de l'air ainsi que son humidité, doit être maîtrisée pour que celle de la surface se stabilise aux alentours de + 7°C. La durée totale est de 36 à 40 heures.

Les résultats tant bactériologiques qu'organoleptiques sont bons. Les exsudats pratiquement inexistants car la masse totale est importante et peu de muscles ont été coupés.

C'est une solution valable lorsque les pièces à décongeler ont un volume important et la température d'utilisation doit être positive.

Par contre, lorsque la matière première congelée est conditionnée en blocs, par exemple viandes désossées, volailles découpées, poissons, fruits, la décongélation par micro-ondes est, le plus souvent, la solution la plus indiquée.

DÉCONGÉLATION PAR MICRO-ONDES

Les principes de la transformation en chaleur de l'énergie des micro-ondes vous sont déjà connus. La formule de dissipation démontre que celle-ci est donc fonction de la fréquence, du carré du champ électrique et du facteur de perte diélectrique du produit à traiter. Or, ce facteur n'est pas uniquement fonction de la matière, mais également de sa température.

Ainsi, pour la viande de boeuf maigre, le facteur de perte est de 0,50 à - 20°C, 1,3 à - 10°C et 13,6 à + 20°C, c'est-à-dire que plus la température augmente, plus grande est l'absorption, donc plus réduite la pénétration. À température positive, le boeuf absorbe 26 fois plus vite les micro-ondes qu'à - 20°C, d'où le phénomène d'emballement de la température constaté par tous ceux qui utilisent déjà un four à micro-ondes domestique.

Il en ressort que certaines précautions doivent être prises pour obtenir, à l'échelle industrielle, des résultats valables.

En effet, contrairement à la glace pure dont la fusion se produit à 0°C, les produits alimentaires se congèlent et décongèlent progressivement. Les cristaux de glace pure sont entourés d'une solution de sels minéraux en concentrations valables.

Ainsi, pour la viande, il reste environ 90% de glace à -10°C, 75% à - 5°C et 50% à - 2-3°C. Toutefois, le produit peut être découpé, haché, formé, etc. à températures négatives - plus avantageuses - tant du point de vue de l'hygiène que de celui de la consommation d'énergie.

Or, seules les micro-ondes permettent une remontée des congelés à des températures négatives mais proches de zéro °C, autorisant leur transformation.

Comparons donc la décongélation à + 4°C et celle par micro-ondes.

Cette étude a été faite par le Centre zootechnique et vétérinaire de l'INRA de THEIX (acétate 4).

Nous avons comparé les deux modes de décongélation suivants:

a) Décongélation en air calme à + 4°C.
b) Décongélation par chauffage au four micro-ondes.

Ces deux modes de décongélation sont par la suite désignés respectivement par DL (Décongélation lente) et par DR (Décongélation rapide).

La comparaison a porté sur les pertes de jus qui interviennent à des degrés divers dans l'appréciation de la qualité d'une viande.

1. Conditions expérimentales

A) Matériel

Les expériences ont été effectuées sur divers muscles de bovin et de porc.

B) Méthode

Les muscles ont été prélevés sur carcasse de 2 à 3 jours après l'abattage et conservés à + 4°C jusqu'à 6 jours post-mortem. Chaque muscle a alors été séparé en deux parties qui ont été emballées sous vide sous film plastique puis congelées.

Deux types de congélation ont été utilisés:

1) Une congélation rapide, par la suite désignée par C.R. L'échantillon est placé dans une armoire à air pulsé à une température de - 40°C jusqu'à ce que la température au coeur atteigne - 20°C, ce qui nécessiterait de 2 à 3 heures. Dans ces conditions, la vitesse moyenne de cristallisation était toujours supérieure à 1 cm/h.

2) Une congélation lente, par la suite désignée par C.L. La température de l'armoire était d'abord maintenue à une température de - 6° pendant 18 heures, puis abaissée à - 20°C. Dans ces conditions, la vitesse moyenne de cristallisation était de l'ordre de 0,2 cm/h.

Dans les deux cas, les échantillons ont été stockés à - 20°C pendant une période courte de 2 à 3 semaines.

La décongélation par micro-ondes a été poussée de façon à obtenir un taux de glace résiduel le plus faible possible et dans la plupart des cas, la taille des morceaux a permis une décongélation totale en quelques minutes. La décongélation à l'air était beaucoup plus lente et nécessitait de 10 à 13 heures. Avant les meusres, les échantillons étaient placés pendant 4 heures dans un thermostat à + 6°C afin d'obtenir une température homogène, celle-ci intervenant de façon notable sur les propriétés électriques et mécaniques.

La conservation jusqu'au temps T_2 a été effectuée également à + 6°C, les échantillons étant placés dans des emballages étanches.

C) Mesures

1) Mesure de pertes de jus

Les pertes de jus ont été déterminées par pesée. Le poids initial de référence a été mesuré avant décongélation, mais après brossage des échantillons afin d'éliminer les cristaux de glace superficiels formés à l'interface viande-sachet. Pendant toutes les opérations ultérieures, les échantillons sont conservés dans des sachets étanches et les pesées aux temps T_1 et T_2 sont effectuées après essuyage pour éliminer l'eau superficielle. Les pertes de poids correspondent

donc aux pertes de jus et sont exprimées en % du poids initial.

2) Résultats

Les résultats de ces diverses mesures sont indiqués sur l'acétate 5.

a) Résultats relatifs aux pertes de jus

L'examen montre qu'à une exception près (muscle A du taurillon 1), les pertes de poids des viandes décongelées par micro-ondes sont nettement inférieures à celles des viandes décongelées dans l'air, aussi bien au temps T_1 qu'au temps T_2.

Le caractère quasi systématique de ces différences incite à penser qu'il existe un effet spécifique du mode de décongélation sur la perte de jus. Toutefois, cette perte de jus est un phénomène continu dont l'intensité varie au cours du temps. Pour les viandes décongelées par micro-ondes, elle est nulle pendant le traitement et ne devient mesurable que quelques heures après la sortie du four. Pour les viandes décongelées à l'air, la perte de jus commence pendant l'opération de décongélation et lorsqu'elles atteignent une teneur en glace comparable à celle des viandes sortant du four à micro-ondes, leur perte de jus est déjà appréciable. Mais les couches superficielles de ces viandes sont décongelées depuis plusieurs heures ce qui pourrait, en partie, expli-

quer les différences de perte de jus entre les deux modes de décongélation. Pour déterminer l'influence du temps sur ces différences, nous avons étudié la dynamique de la perte de jus pour les deux modes de décongélation. L'acétate 4 montre le principe de ces mesures et un exemple typique d'évolution des pertes de poids et de la température au cours du temps.

Les courbes de pertes de poids pour les deux modes de décongélation ont des allures semblables et ne diffèrent que par l'intensité et par un décalage dans le temps. L'écart entre les deux courbes subsiste et présente souvent une tendance à une légère augmentation pour des temps postdécongélation importants. On notera également que dans le cas de nos expériences, les valeurs relevées aux temps T_2 correspondent sensiblement aux 2/3 de la valeur maximale des pertes de jus que l'on peut, en pratique, observer, les développements microbiens limitant la conservation de ces viandes à une faible durée.

Ces expériences confirment que la décongélation par micro-ondes entraîne de façon spécifique une importante réduction des pertes de jus, l'importance de cette réduction pouvant être valablement déduite de la comparaison des résultats obtenus au temps T_2. Le gain sur la perte de jus qui résulte d'une décongélation par micro-ondes varie notablement selon le muscle considéré. Dans le cas des expériences portant sur les vaches et les taurillons, l'échantillonnage des muscles étant identique pour toutes les expériences, on peut

effectuer une comparaison identique pour toutes les expériences, on peut effectuer une comparaison globale de l'effet des divers traitements à partir des moyennes des pertes de jus des cinq muscles considérés. Ces moyennes sont reportées sur l'acétate 9, qui met en évidence les résultats suivants:

- La moyenne des pertes de poids des viandes décongelées par micro-ondes est sensiblement constante, de l'ordre de 2,5%. Le mode de décongélation et l'âge de l'animal sont sans effet.

- Dans le cas de la décongélation dans l'air, les pertes de jus des viandes congelées rapidement sont plus élevées, la différence étant significative surtout dans le cas des vaches.

Les mêmes avantages apparaissent lorsque des fruits sont décongelés par micro-ondes. Ainsi, comparons les exsudats après décongélation à l'air et aux micro-ondes de pêches PAVIE (acétates 6 et 7).

La décongélation industrielle par micro-ondes

Il ressort de ce qui précède que chaque fois qu'une industrie utilise de la matière première congelée dans un processus de fabrication continu et, ceci, pendant une période importante de l'année, elle a intérêt d'utiliser ce moyen de décongélation, par exemple dans l'industrie de la viande:

- Viande portionnée (portion control)
- Viande hachée pour hamburger
- Viande broyée pour saucisson sec (voir acétate 8)

Ici, l'utilisation des micro-ondes apporte le grand avantage que les cellules lipidiques restent entières alors qu'elles éclatent lorsque la viande est broyée congelée, ce qui cause de nombreuses difficultés lors du séchage et de la fermentation.

De même, en "portion control", les avantages sont tels que l'investissement d'un tunnel à micro-ondes s'amortit en moins de deux ans, généralement en 2 000 heures d'utilisation pour un GIGATRON 30 (acétate 9).

- Comparaison de coût:

- Chambre à + 4°C
- Tunnel à micro-ondes

Investissement

Chambre à + 4°C

1 m^3 de volume de stockage coûte environ 2 500 Frs. Sur 1,6 m^2, soit 4 m^3, on peut mettre un chariot portant environ une tonne de produit.

Durée de décongélation: 3 jours ou $\frac{1\ 000}{3 \times 4}$ = 83 $kg/m^3/j$

soit $\frac{2\ 500}{83}$ = 30 F/kg/j X 24 = 720 F/kg/h

Lorsqu'il s'agit de muscles individuels, le poids par m^3 est encore inférieur et on approche du coût par kg/h du tunnel micro-ondes. En outre, la chambre de décongélation doit être calculée en fonction des productions de pointe, c'est-à-dire avoir un volume utile de 20% à 40% supérieur à celui normalement nécessaire.

Tunnel micro-ondes

Un tunnel pour décongeler environ 1 t/h de - 18°C à - 3°C, soit un GIGATRON 30, coûte environ 1 million de francs français, soit 1 000 F/kg/h.

Il est vrai qu'un tunnel est rarement utilisé 24 heures sur 24, comme l'est une chambre froide.

Calcul capacité de stockage/m^3: Carton: 160 X 420 X 600 Espace nécessaire: 200 X 500 X 600 = 0,060 m^3	Sur 1,6 m^2, on peut placer un chariot de 2 m de haut sur 1,20 m de long et 1 m de large, soit neuf étages de 4 blocs = 36 blocs d'environ 27 kg, soit 1 tonne.

Exploitation

Chambre de décongélation

La consommation d'énergie par mètre cube dépend de nombreux paramètres:

- Climat.
- Isolation thermique de la salle.
- % d'utilisation, le système de climatisation fonctionnant quelle que soit la charge, et la chambre étant calculée pour satisfaire les besoins des pointes de production.

Il est donc pratiquement impossible de calculer un coût d'exploitation représentatif. Celui-ci peut varier du simple au double, d'une usine à l'autre.

Il est, par contre, évident qu'il s'agit d'un système ayant une inertie de coût importante, dont l'exploitation peut devenir très onéreuse si son utilisation dans le courant de l'année, varie beaucoup.

Entretien: Une bonne hygiène exige un nettoyage "à fond" tant des chariots et clayettes, que de la chambre proprement dite, les exsudats causés par décongélation étant des milieux de culture idéaux.

- Les chariots et clayettes, après chaque utilisation, dont deux fois par semaine, la chambre une fois par semaine quand elle doit être vidée de toute marchandise. Tant le coût de

main-d'oeuvre que celui des produits de nettoyage sont donc très importants.

TUNNEL À MICRO-ONDES

Consommation électrique

1 tonne/heure de - 18°C à - 3°C nécessite une puissance micro-ondes installée de 30 kW. La consommation au secteur sera de 60 kW maximum.

Coût par kilo

Électricité:

60 X 0,35 = ... 21,-- F/h

Changement des magnétrons

$\frac{30 \times 2\,500}{3\,000}$ F = ... 25,-- F/h

Eau de refroidissement

2 m^3/h x 3,3 F = ... 6,6 F/h

Entretien (négligeable)

+ ou - ..... 8,-- F/h

Total ..... 60,6 F/h

Soit $\frac{60,6}{100}$ = 0,0606 F/kg

L'amortissement du capital investi est du même ordre de grandeur. On arrive donc à un coût maximal de 0,15 FF/kg soit, en calculant le dollar canadien à 5,80 F:

$$\frac{0,15 \times 100}{5,80} = 2,58 \text{ centimes canadiens/kg}$$

Un prix modique est très rapidement amorti lorsqu'on considère qu'une économie en exsudats de 3% seulement vaut 3 centimes lorsqu'on prend un prix au kilo de la viande de 1 dollar seulement !!!

Tous les autres avantages

1- Économie de surface d'usine, par l'élimination des chambres de décongélation, des chariots et paniers ou clayettes.

2- Amélioration de la production grâce à une température plus uniforme à travers le produit.

3- Hygiène accrue par l'élimination de la prolifération bactérienne, particulièrement importante grâce à l'excellence du milieu.

4- Qualités organoleptiques et nutritionnelles améliorées par la rétention des sels et protéines, normalement perdues par exsudation en décongélation classique.

5- Flexibilité dans la production, voisine de celle obtenue en utilisant les produits frais.

SÉCHAGE

1- Pour mieux comprendre l'avantage de l'utilisation des micro-ondes pour le séchage des produits alimentaires, examinons-en d'un peu plus près le mécanisme.

Schématiquement, toute substance humide peut être considérée comme un système ayant deux phases distinctes:

- l'eau d'un côté;
- de l'autre le matériau qui l'absorbe.

La séparation des deux phases exige un apport d'énergie qui sert à vaincre les forces d'adhésion et ainsi séparer l'eau de son substrat.

Ces forces d'adhésion sont très variables. Une image approximative du degré de liberté de l'eau par rapport à son substrat est donnée par la comparaison de la pression P de la vapeur saturée de la substance mouillée avec la pression Po de la vapeur saturée de l'eau "libre" aux mêmes conditions de température et de pression ambiante.

Lorsque l'eau à l'intérieur de la substance imbibée est "libre"

$$P = Po$$

lorsqu'elle ne l'est plus:

$$P < Po$$

le rapport $\frac{P}{Po} = a_w$ définit l'activité de l'eau.

Lors du séchage, les molécules qui sont évacuées les premières sont celles de l'eau "libre". Par contre, celles qui sont "liées" par des forces électrostatiques aux molécules organiques, partent les dernières. La courbe de désorption illustre la relation entre le contenu d'eau "m" et l'activité de l'eau a_w (acétate 10).

Entre 0 et 0,2 les forces d'adhésion appelées aussi de Van der Waals, sont très importantes. Lorsqu'il s'agit par exemple de protéines, cette situation correspond à une monocouche de molécules d'eau en contact. Entre 0,2 et 0,6, un équilibre existe entre la couche monomoléculaire et la zone dans laquelle l'énergie cinétique de la molécule d'eau devient suffisante pour la libérer.

Pour une activité de l'eau $> 0,6$ correspond une partie d'eau libre qui n'est retenu dans le substrat que par les forces de capillarité.

Les micro-organismes ne peuvent assimiler l'eau que lorsqu'elle est "libre". Il en est de même pour les réactions enzymatiques ou la solvatation des ions.

Physiquement, l'image d'un sybstrat organique imbibé peut être illustrée comme ici (acétate 11).

- D'abord, la couche monomoléculire à forte adhésion.
- Ensuite, la zone intermédiaire d'équilibre.
- Enfin, celle de l'eau libre retenue par capillarité.

L'énergie de liaison dépend donc beaucoup de la teneur en eau, également, bien entendu, de la nature du substrat. Ainsi, pour l'amidon, cette énergie peut atteindre 160 kcal par litre d'eau.

Pour sécher totalement, il faut donc apporter de l'intérieur, une énergie équivalente, ce qui est très difficile par convection ou contact car le rendement est très faible, à laquelle il faudra ajouter celle nécessaire au transfert de masse.

L'utilisation des micro-ondes, en règle générale, est presque toujours rentable lorsqu'il s'agit d'enlever l'eau pseudofluide (activité de l'eau entre 0,2 et 0,6) et toujours lorsqu'il faut vaincre les forces de Van der Waals (acétate 12).

Ainsi, en séchant le lait par atomisation, l'énergie utilisée pour enlever les derniers pourcentages d'eau est de 5 à 6 fois plus élevée en fin de séchage, alors que, par micro-ondes, le rendement est proche de 50% (acétate 13).

La plupart des procédés de séchage font appel au transfert de chaleur par convection. Les conditions de séchage par convection sont définies par la relation:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{K.S.\Delta\theta}{\lambda} = K'S.\Delta P$$

avec:

K = le coefficient de transfert de chaleur

λ = la chaleur lente de vaporisation

S = la surface d'évaporation

$\Delta\theta$ = La différence entre la température de l'air et celle à la surface du produit

K' = le coefficient de transfert de masse

Δ P= la différence entre la pression de la vapeur d'eau dans le produit et la pression de la vapeur d'eau dans l'air

Pour optimiser le séchage, il faut donc:

- soit augmenter la surface, d'où l'utilisation de méthodes comme le séchage en couche mince sur cylindre, l'atomisation, etc;

- soit augmenter la différence de températures, possibilité limitée par le croûtage superficiel et le brunissement des produits alimentaires;

- soit faciliter le transfert de masse K' en jouant sur les caractéristiques du fluide séchant (température, hygrométrie, etc.);

- soit en se rendant indépendant de K, ce que l'utilisation des micro-ondes apporte comme principal avantage.

Comparons un séchage par convection d'air chaud et un séchage par micro-ondes (fig. 10).

La rapidité du séchage par micro-ondes est due à:

- l'apport possible d'une grande quantité d'énergie en un temps très court, dans toute la masse. Le séchage étant avide en calories, c'est là un avantage important;

- la création d'un gradient positif de température, de l'intérieur du corps séché ($\theta 1$) vers l'extérieur ($\theta 2$) ($\theta 1 - \theta 2 > 0$), l'ambiance étant plus froide que la substance à sécher. Il existe donc un gradient de pression favorable à l'expulsion de vapeur d'eau (acétates 14 et 15);

- l'absence de croûtage (pas de chauffage de l'ambiance);

- la plus grande fluidité de l'eau à température élevée d'où un écoulement facilité à travers les capillaires;

- enfin et surtout: l'absorption privilégiée des micro-ondes par l'eau. Nous avons vu que ce sont les régions les plus riches en eau qui absorbent le plus d'énergie. Avec un séchage classique, au fur et à mesure que le taux d'humidité décroît, l'épaisseur de la couche sèche augmente et rend très difficile l'extraction des 15 derniers pour cent.

Une autre conséquence de la propriété des micro-ondes est l'apparition, dans le cas du séchage, d'un phénomène d'autorégulation du taux d'humidité et de la température du produit qui dépasse difficilement 100°C à l'atmosphère. Donc, l'utilisation des micro-ondes augmente de beaucoup la vitesse d'évaporation, en réduisant la période de réchauffement

(avec l'avantage supplémentaire de l'absence de croûtage), et surtout celle de finissage.

D'où les applications nombreuses des micro-ondes dans l'industrie alimentaire et pharmaceutique.

a) Le séchage à pression ambiante

1) Le séchage au laboratoire:

Avec de 0,5 à 1 kW de puissance utile maximale, la durée du séchage est de l'ordre de 10 min pour 5 à 6 capsules de 5 à 10 g chacune d'échantillon. La méthode est reproductible, et la précision est supérieure ou égale à 0,1%. Le dosage rapide de l'humidité rend des services incalculables aux industriels.

2) Le séchage industriel:

Jusqu'à des teneurs en humidité de 10% à 15%, le séchage par les moyens classiques ou par les infrarouges a un rendement suffisant. C'est pour ces derniers pour cent que l'adjonction des micro-ondes représente un intérêt certain.

Il existe ainsi de nombreuses installations de séchage mixte pour les pâtes alimentaires et les granulés pharmaceutiques (air chaud et micro-ondes), pour les pommes chips (friteuse et micro-ondes); les corps gras et les ampoules de verre pour soluté injectable sont séchés par les micro-ondes seules.

Les temps de séchage sont généralement diminués de 20 à 40 fois.

b) Le séchage sous vide

Pour limiter l'échauffement d'un produit thermolabile à déshydrater, le moyen le plus efficace est l'utilisation du vide, vide qui, dans le cas des procédés ordinaires, ne peut être utilisé, car il constitue un très bon isolant thermique.

1) Sous vide poussé, c'est-à-dire dans un lyophilisateur:

La lyophilisation consiste à sublimer la glace avec un vide inférieur ou égal à $5,10^{-2}$ Torr. La déshydratation est effectuée à des températures inférieures ou égales à 40°C pendant des cycles d'une durée minimale de 6 heures. Des essais de laboratoire ont été faits pour substituer une source micro-ondes aux panneaux radiants. La vitesse de lyophilisation a été multipliée par 3 à 7 fois, mais le prix de revient de l'opération est encore plus prohibitif.

2) Sous vide moins poussé, c'est-à-dire avec une pression de 2 à 20 Torr, pression plus accessible aux industriels.

Des essais ont montré qu'il est toujours possible de lyophiliser. Avec 1,5 Torr, les cycles ont une durée d'environ 3 heures. En fait, sous de telles pressions, il n'est plus nécessaire de congeler. L'épaisseur de demi-absorption des

micro-ondes est diminuée mais demeure toujours de l'ordre de plusieurs centimètres, ce qui est suffisant en séchage.

Ce nouveau procédé de dessiccation sous vide et sous micro-ondes appelé GIGAVAC et développé par la Sté IMI avec le concours de l'I.R.A.B., consiste:

- à expanser un produit liquide ou semi-liquide dont la concentration en matières sèches est 50% sous la forme d'une mousse de 10 à 20 cm d'épaisseur;

- à chauffer de la température ambiante jusqu'à 45°C maximum, à l'aide de micro-ondes à 2 450 MHz. La température d'évaporation est fonction du vide appliqué, et peut être régulée à l'aide d'un pyromètre à infrarouge. L'espèce de meringue obtenue durcit très rapidement et est extraite après broyage par l'intermédiaire de sas.

Les températures très basses (de 20°C à 45°C) et les cycles très courts (de 20 à 30 min) permettent une excellente rétention des arômes.

Ce procédé permet d'obtenir des poudres instantanées (paillettes) à haut pouvoir de redissolution (poudre de fruits ou de plantes aromatiques, produits aromatiques divers, colorants, produits chimiques et pharmaceutiques tels qu'hydrolisats, granulés divers). Les produits solides entiers ou en fragments ont une forme moins bien conservée qu'en lyophilisation.

Le GIGAVAC peut évaporer jusqu'à 100 L/h. Son prix de revient au kilogramme d'eau évaporée est deux fois moins cher que la lyophilisation et deux fois plus cher que l'atomisation, avec l'avantage d'une qualitté comparable à la lyophilisation. Plus la matière sèche est élevée, plus le procédé devient compétitif.

COÛT DE PRODUCTION POUR DE LA POUDRE D'ORANGES
À 63 BRIX - CAPACITÉ D'ÉVAPORATION 50 LITRES/H

Consommation horaire:		Consommation/litre d'eau:
Électricité:	110 kW	2,20 kW
Vapeur:	140 kg/h	2,8 kg

Investissement: Fr. 4 800 000 --

Production horaire: $\frac{50}{0{,}5625\ (x)}$ ..... 88,8 kg de poudre

Production annuelle en 47 semaines à 110 h/semaine
(10 h/semaine d'entretien) =
5 170 X 88 kg/h .... 455 T/an

Amortis - 10 ans à 10% en 10 annuités constantes

Facteur annuités constantes 0,1627 x
4 800 ..... Fr. 780 900 --

Coût par litre d'eau évaporée:

Électricité	2,20 X 0,40 ...	Fr.	8,88 FF
Vapeur:	$\frac{2,8 \times 200}{1\,000}$	Fr.	0,56 FF
Amortissement équipement:	$\frac{780,900}{50 \times 5,170}$	Fr.	3,02 FF
Entretien:			
Remplacement Magnétrons:	$\frac{12\,000 \times 8}{3\,000 \times 50}$ ..	Fr.	0,64 FF
Autres (1% du prix):	$\frac{4\,800\,000}{100 \times 50 \times 5\,170}$	Fr.	0,18 FF
	TOTAL:	Fr.	5,28 FF
	Main-d'oeuvre (une personne) ..	Fr.	2,00 FF
	TOTAL par LITRE D'EAU :	Fr.	7,28 FF
7,28 x 0,5625 .....TOTAL par KG de POUDRE:		Fr.	4,905 FF

Le coût de la lyophilisation est de 3 à 4 fois supérieur, le produit initial à 63 Brix devant être redilué à 30° - 40° Brix pour pouvoir être lyophilisé.

(x) en tenant compte de 2% d'humidité résiduelle et 63% d'extrait sec $\frac{63}{0,98}$ 64 $\frac{100 - 64}{64}$ = 0,5625 l à évaporer pour obtenir 1 kg de poudre.

QUALITÉ DES POUDRES DE FRUITS

1) Qualité nutritionnelle:

En raison de la température modérée à laquelle le séchage est fait, les principales caractéristiques analytiques demeurent inchangées. Nous avons vérifié - en particulier - l'absence d'altération des sucres, des acides organiques, des protéines. Nulle trace d'hydroxy-méthylfurfurol n'apparaît au cours du traitement. Les dosages montrent également que les pertes en vitamine C sont faibles ou nulles (voir Tableau 1). La couleur des fruits n'est pas modifiée: ceci est vrai pour la fraise, pour la framboise, et pour le raisin rouge, dont les anthocyanes sont déshydratés sans altération du spectre d'absorption.

	Framboise		Fraise	
	Témoin	Poudre m-o	Témoin	Poudre m-o
A. déhydro-ascorbique	19,5	16,1	29	25,7
A. ascorbique total	25,5	23,4	45	43
Méthanol	16,8	16	22,8	11,2
Éthanol	490	210	140	60

Tableau 1: Teneur en vitamine C et en substances volatiles de poudres de fruits, obtenues par séchage sous micro-ondes.

Matière sèche du fruit: 9% du total pour la framboise; 7,4% pour la fraise. Pression: 10 Torr. Résultats exprimés en mg/L d'une solution à 10° Brix.

2) Qualité aromatique:

D'une manière générale, il y a toujours perte de substances volatiles au cours d'une distillation sous vide. Il faut s'assurer cependant que ces pertes sont les plus faibles possible, et qu'elles ne dénaturent pas l'arôme initial du fruit.

On peut, dans une première étape, considérer l'ensemble des substances volatiles réductrices, et voir ce qu'elles deviennent après dessiccation. HUET (x) a ainsi trouvé pour ces substances un taux de rétention de 11% dans un jus de grenadille séché par atomisation, de 33% dans un jus lyophilisé et de 82% dans le même jus séché par micro-ondes. Il a ensuite précisé ce que devenaient quelques composants de cette fraction volatile, et a constaté que leur taux de rétention augmentait avec leur poids moléculaire, ceci étant dû, vraisemblablement, à une plus faible vitesse de diffusion des molécules les plus lourdes dans le milieu liquide, riche en sucre.

(X) R. HUET - "Rétention des arômes dans les poudres de fruits tropicaux obtenues dans un four à micro-ondes sous vide" - FRUITS 1974, 29, N° 5 - pp. 399-405.

Nous avons nous-mêmes observé des pertes assez importantes en méthanol et en éthanol dans des poudres de fraises et framboises, mais ceci était sans conséquence pour la qualité aromatique du produit (voir Tableau 2). Dans le cas du jus d'oranges, nous avons voulu reprendre la comparaison entre la lyophilisation et le séchage par micro-ondes. Un même concentré d'oranges à 62° Brix a été ainsi déshydraté selon les deux procédés.

		Atomisation	Lyophi-lisation	Micro-ondes
Substances volatiles réductrices	(1)	11,0%	33,1	82,5
Acétate d'éthyle	(2)	2,9%	23,5	31,1
Méthanol	(2)	150	--	42,5
Éthanol	(2)	6,7		57,0
Butyrate d'éthyle	(2)	7,2	42,9	59,2

Tableau 2: Taux de rétention des composés volatils du jus de grenadille déshydraté. (Selon R. HUET - Revue FRUITS, 1974, N° 5, page 403)

(1) Déterminées après distillation par réduction du mélange sulfochromique.

(2) Déterminés par chromatographie gazeuse dans les vapeurs émises par le jus de fruits.

La lyophilisation a été rédigée par monsieur F. SAUVAGEOT à Dijon (x) dans un appareil SMJUSIFROID, selon le mode opératoire suivant:

. Concentré d'oranges préalablement dilué à 40° Brix;

. Plateau à fond grillagé avec charge à 10 kg/m^2 de granulés obtenus dans un appareil FREWITT dans une enceinte à 45°C;

. Chauffage par plaques supérieur et inférieur à 50° C;

. Température du piège: 60° C;

. Pression dans l'enceinte: 0,05 Torr;

. Durée du cycle: 16 - 17 heures avec température finale de + 50° C pendant deux heures.

Le tableau 3 montre que si les hydrocarbures mono-terpéniques sont retenus à 100% dans les deux poudres, le décanal, par contre, subit une perte de 39% identique dans les deux cas. Le décanal a été choisi comme représentatif de la fraction terpénique oxygénée, qui est responsable de la note aromatique caractéristique des agrumes. Pour vérifier l'incidence du procédé de séchage sur la qualité aromatique de

---

(x) Laboratoire de Biologie Physico-Chimique de l'E.N.S.B.A.N.A. à Dijon.

ces poudres d'oranges, plusieurs épreuves d'analyses sensorielles ont été réalisées par monsieur Sauvageot (xx), et ont donné les résultats suivants:

	Lyophilisation	Micro-ondes
Hydrocarbures monoterpéniques (1)		
- en ml/l de limonène	0,2	0,2
- taux de rétention	100	100
Décanal (2)		
- taux de rétention	61	61

Tableau 3: Rétention des arômes dans un jus d'oranges déshydraté, puis reconstitué à 10° Brix.

(1) Dose après entraînement à l'isopropanol, par la méthode au bromure-bromate.

(2) Déterminé par chromatographie gazeuse après extraction au pentane.

CONCLUSION:

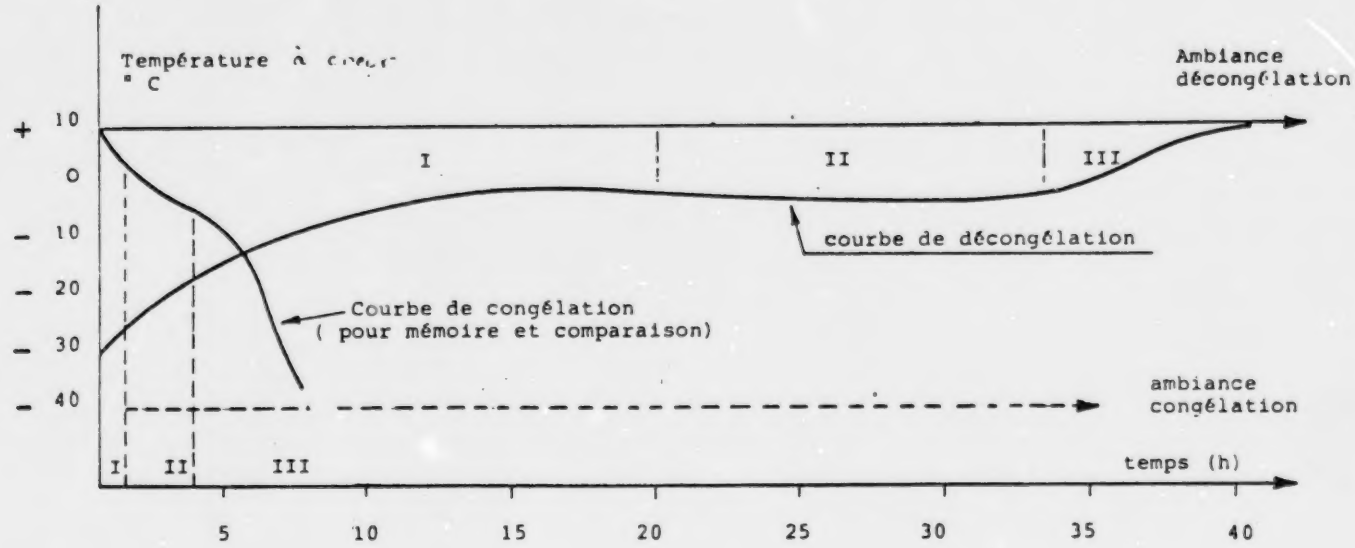
Le procédé de déshydratation GIGAVAC représente un compromis très intéressant entre les méthodes classiques de séchage et la lyophilisation.

(xx) F. Sauvageot (I.B.A.N.A. - Dijon), Communication personnelle.

La possibilité de sécher des liquides ou des solides lui confère une grande polyvalence, permettant son utilisation dans des industries très diverses. Le séchage sous vide, à des températures contrôlées particulièrement basses, d'extraits concentrés confère au produit une qualité égale ou supérieure à celle offerte par le lyophilisation, comme en témoignent les études faites à l'I.B.A.N.A. (Dijon), ainsi que les travaux de monsieur Huet, confirmés par des dégustations comparées de jus de fruits en poudres élaborées, soit par lyophilisation, soit par GIGAVAC.

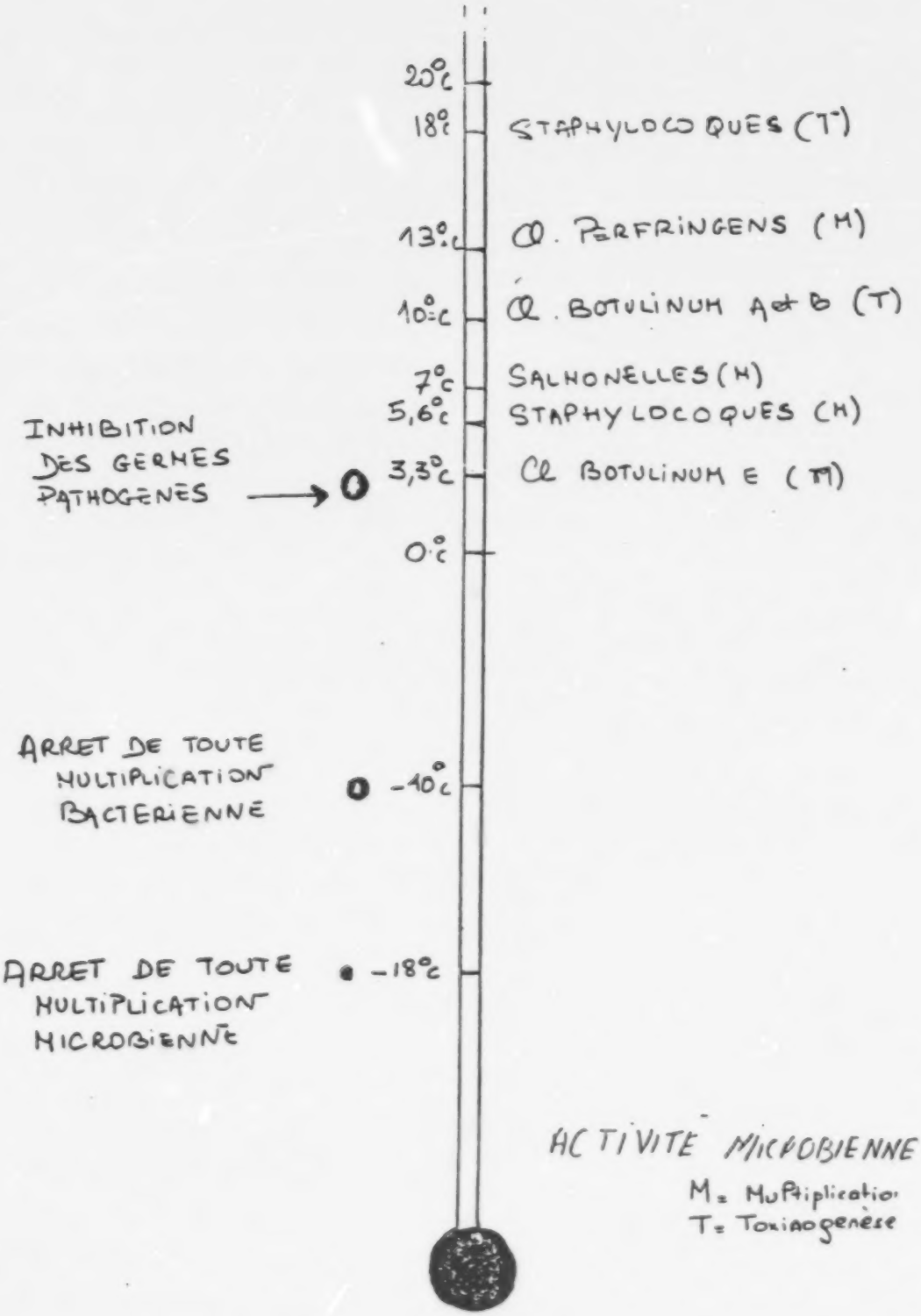
Le coût du procédé est très compétitif, surfout si l'on a la possibilité de concentrer l'extrait de départ jusqu'à un ° Brix très élevé. De même, la possibilité offerte par le sas d'introduction de matières solides permet des déshydratations secondaires de produits granulés (industrie pharmaceutique, alimentaire ou chimique).

Acétate 1



Comparaison entre la courbe de congélation et celle de décongélation (Doc.CNERPAC)

Acétate 2


20°c
18°c
STAPHYLOCOQUES (T⁻)
13°c
Cl. PERFRINGENS (M)
10°c
Cl. BOTULINUM A et B (T)
7°c
SALMONELLES (M)
5,6°c
STAPHYLOCOQUES (M)
INHIBITION DES GERMES PATHOGENES
3,3°c
Cl BOTULINUM E (T)
0°c
ARRET DE TOUTE MULTIPLICATION BACTERIENNE
-10°c
ARRET DE TOUTE MULTIPLICATION MICROBIENNE
-18°c
ACTIVITE MICROBIENNE
M = Multiplication
T = Toxinogenèse

Acétate 3

	Période de chauffage	Période de refroidissement intermédiaire	Période d'égalisation
Température	+ 14°C ± 1	+ 10°C ± 2	0 + 2°C
Coefficient de brassage	200	200	100
Humidité relative	95 / 98 %	95 / 98 %	60 / 70 %
Durée	≤ 20 H	< 12 hrs	4 H

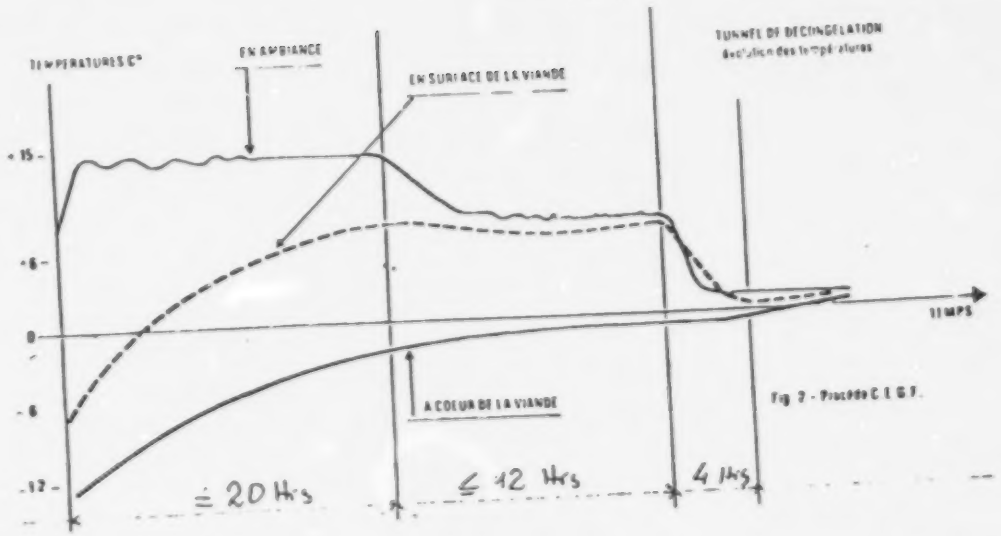
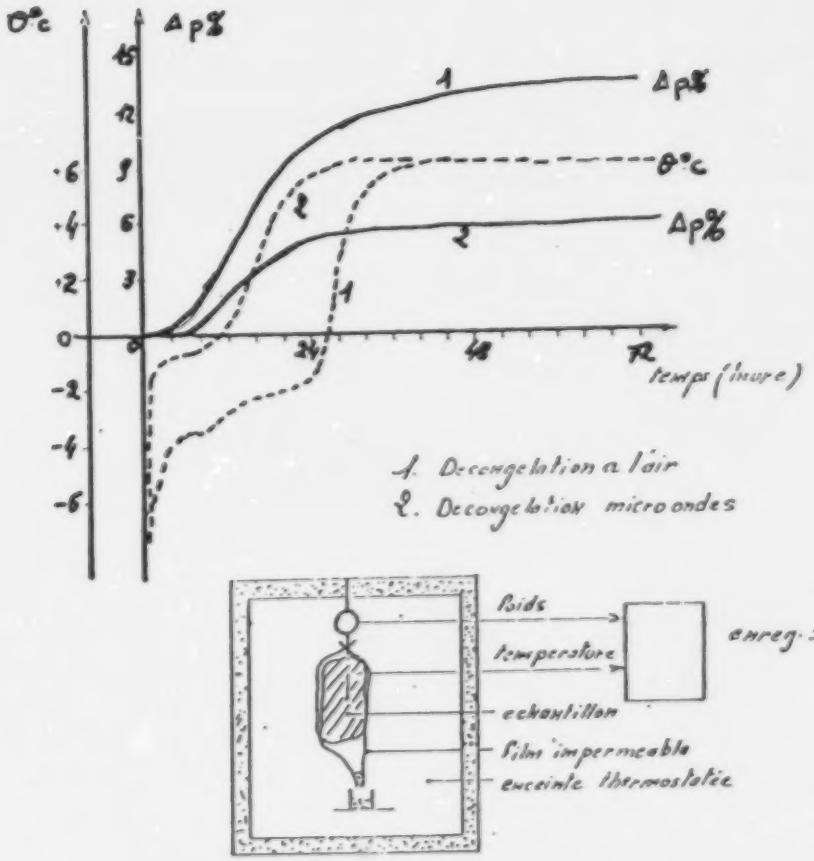


Fig 2 - Procédé C.I.G.F.

Acétate 4

27 Septembre 1979



Acétate 5

27 Septembre 1979

Pertes de jus (DP) et "eau libre" (El)

		Muscle	DL				DR			
			DP %		EL %		DP %		EL %	
			T_1	T_2	T_1	T_2	T_1	T_2	T_1	T_2
Vache	CR	A	5,3	7,1	14	12	1,4	3,5	14	15
		B	4,1	5,1	12	11	0,9	2,4	13	14
		C	3,9	4,9	12	11	0,7	1,7	14	14
		D	6	7,1	13	12	1,3	2,3	13	14
		E	6,5	8	14	12	1,1	2,6	15	14
	CL	A	6,9	8	15	12	1	3,1	11	8
		B	3	4,4	11	8	0,8	2,5	14	11
		C	2,6	3,8	12	12	0,4	1,6	14	12
		D	4,7	5,6	14	11	1	2,2	13	12
		E	4,7	6,8	13	11	0,7	2,4	16	12
Taurillon	CR	A	1,8	4,2	17	14	2,1	4,5	16	16
		B	4,1	5,7	14	12	0,9	1,6	15	15
		C	1,7	3,3	17	10	1,2	2,2	14	13
		D	2,2	3,6	20	12	1,6	3	14	14
		E	2,5	4,1	18	13	0,8	2,8	18	15
	CL	A	4,2	6,6	15	12	1,9	4	14	10
		B	4,6	6,1	14	11	0,9	1,8	15	11
		C	2,3	3	12	12	0,7	1,3	15	10
		D	5,1	6,2	12	11	1,4	2,6	15	12
		E	2,1	4	15	14	2,1	3,4	16	13
Veau	CR	P	1	2,3	15	12	0,3	1	18	14
	CL	P	1,6	3,1	13	11	1	2	16	11
	CR	F	2,2	4	11	10	2	2,9	14	12
	CL	F	4,9	6	10	9	3,3	5,1	14	10

-=-=-=-=-=-=-=-=-=-

N.B. - L.M.I. - Les Micro-Ondes Industrielles =
I.M.I. - INDUSTRIES MICRO-ONDES INTERATIONALES - S.A.

D.G./NM/FK/CC

Acétate 6

Exudats mesurés après 8 h 30

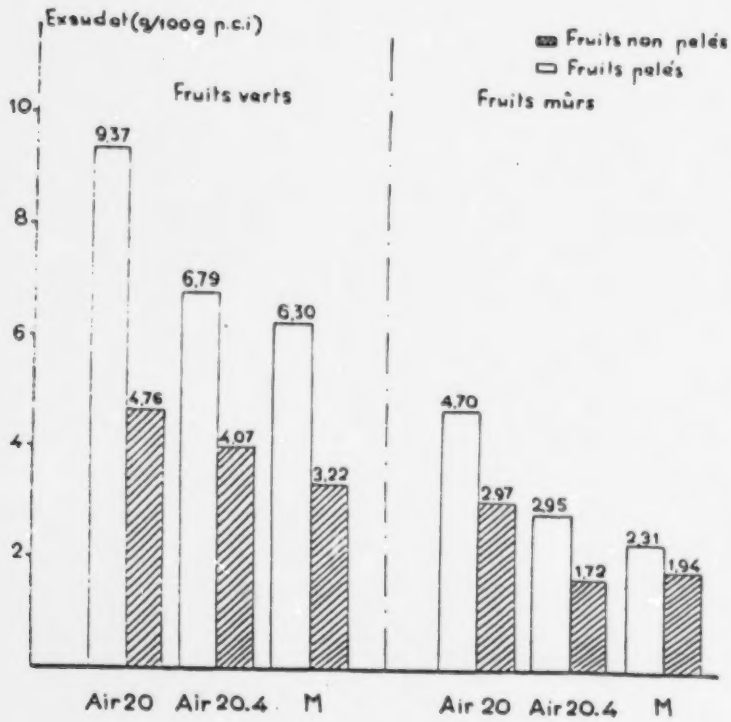


Fig. 5 - Variations de la quantité d'exsudat émise en fin de décongélation (après 8 h 30 mn) par les pêches Pavie (var. Vivian), pelées ou non pelées, de 2 stades de maturité (fruits verts et fruits mûrs), en fonction de divers traitements de décongélation : Air 20°C (Air 20), air 20°C puis 4°C (Air 20.4) et micro-ondes puis air 4°C (M).

Exudats mesurés immédiatement après décongélation

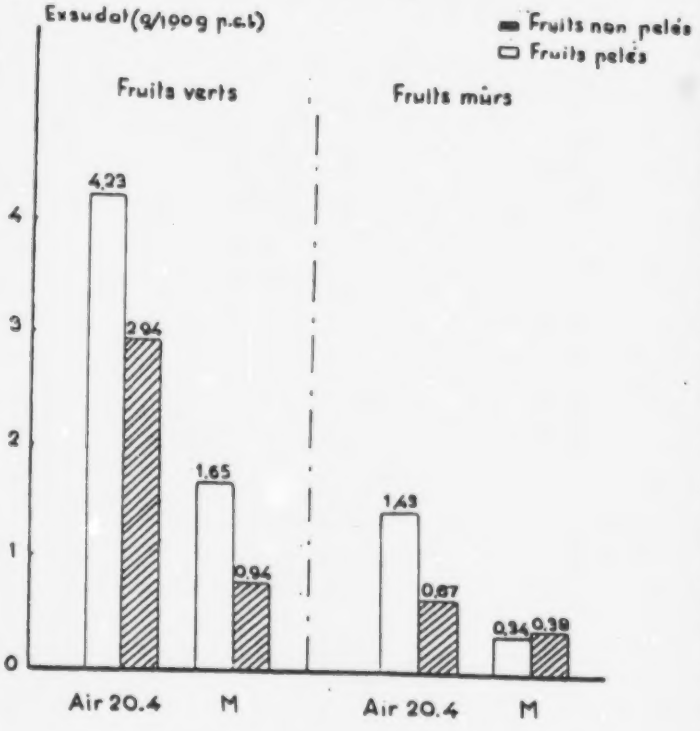


Fig. 6 - Variations de la quantité d'exsudat émise par les pêches Pavie (var. Vivian), pelées ou non pelées, de 2 stades de maturité (fruits verts et fruits mûrs) lorsque la température à cœur des échantillons atteint 4°C (durée de décongélation Air 20.4 : 6 h 30 mn, durée de décongélation par micro-ondes : 5 mn).

Acétate 7

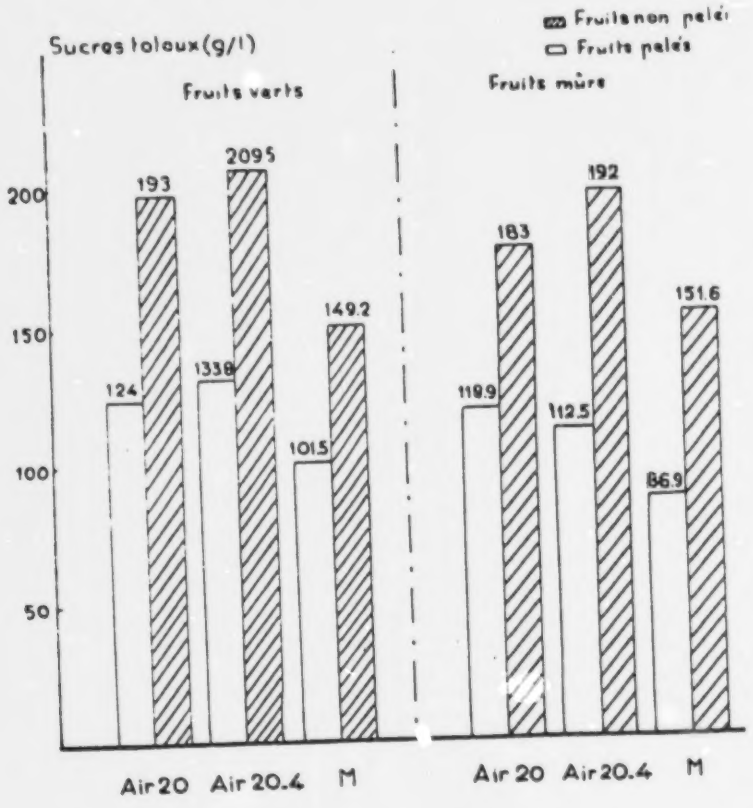


Fig. 7 - Variations de la concentration en sucres solubles totaux de l'exsudat (g/l) émis par les pêches Pavie (var. Vivian), pelées ou non pelées, de 2 stades de maturité (fruits verts et fruits mûrs), en fonction de divers traitements de décongélation : air 20°C (Air 20), air 20°C puis 4°C (Air 20-4) et micro-ondes puis air 4°C (M).

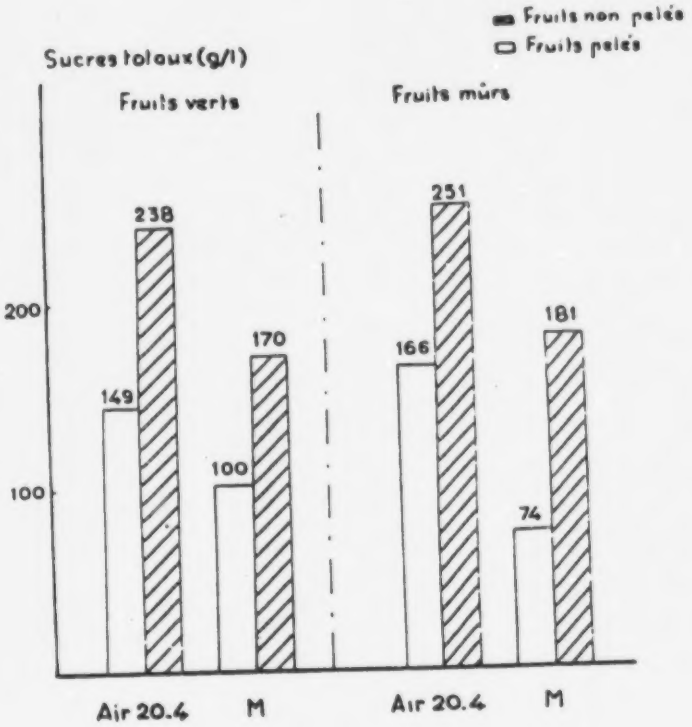
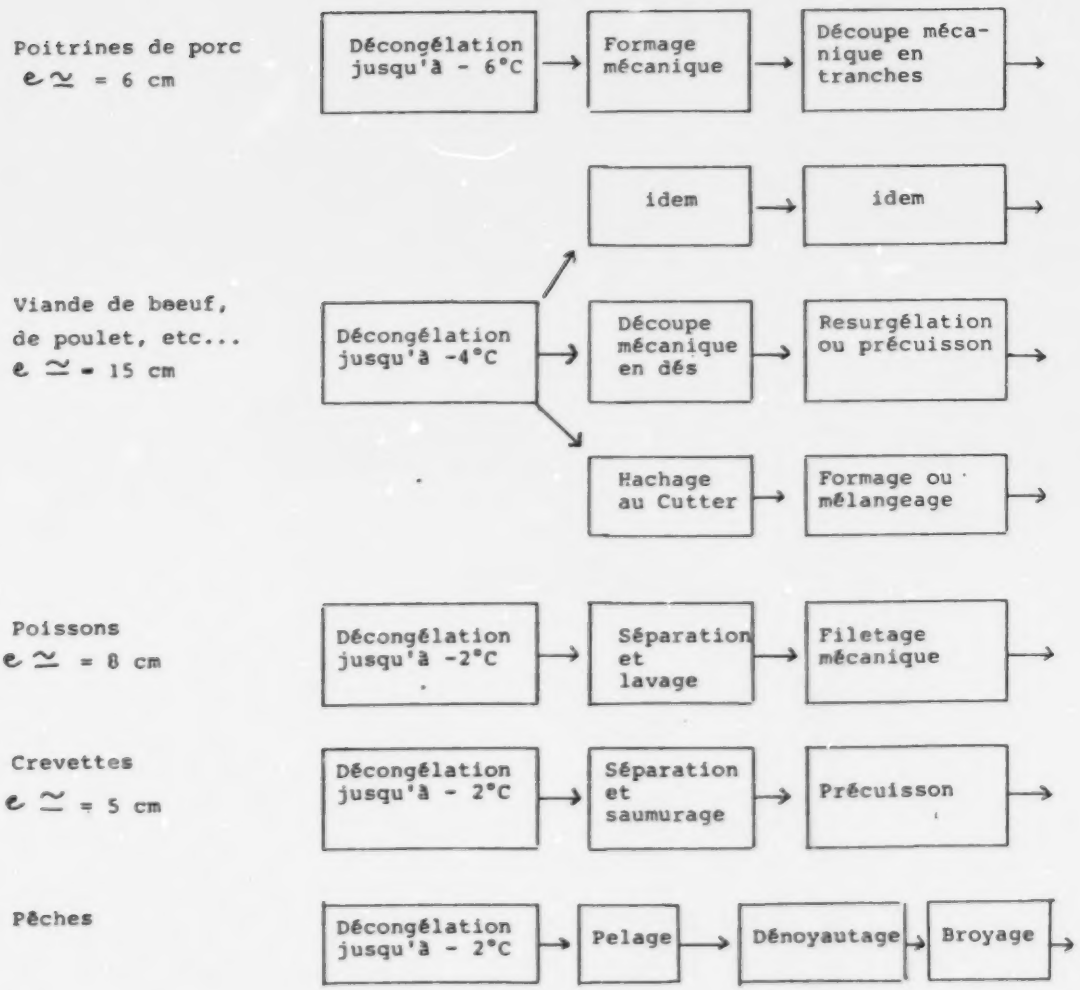


Fig. 8 - Variations de la concentration en sucres solubles totaux de l'exsudat (g/l) émis par les pêches Pavie (var. Vivian), pelées ou non pelées, de 2 stades de maturité (fruits verts et fruits mûrs) lorsque la température à cœur des oreillons atteint 4°C (durée de décongélation Air 20-4 : 4 h 30 mn ; durée de décongélation par micro-ondes : 9 mn).

Acétate 8

EXEMPLES de LIGNE INDUSTRIELLE INTEGRANT une DECONGELATION

par MICRO- ONDES



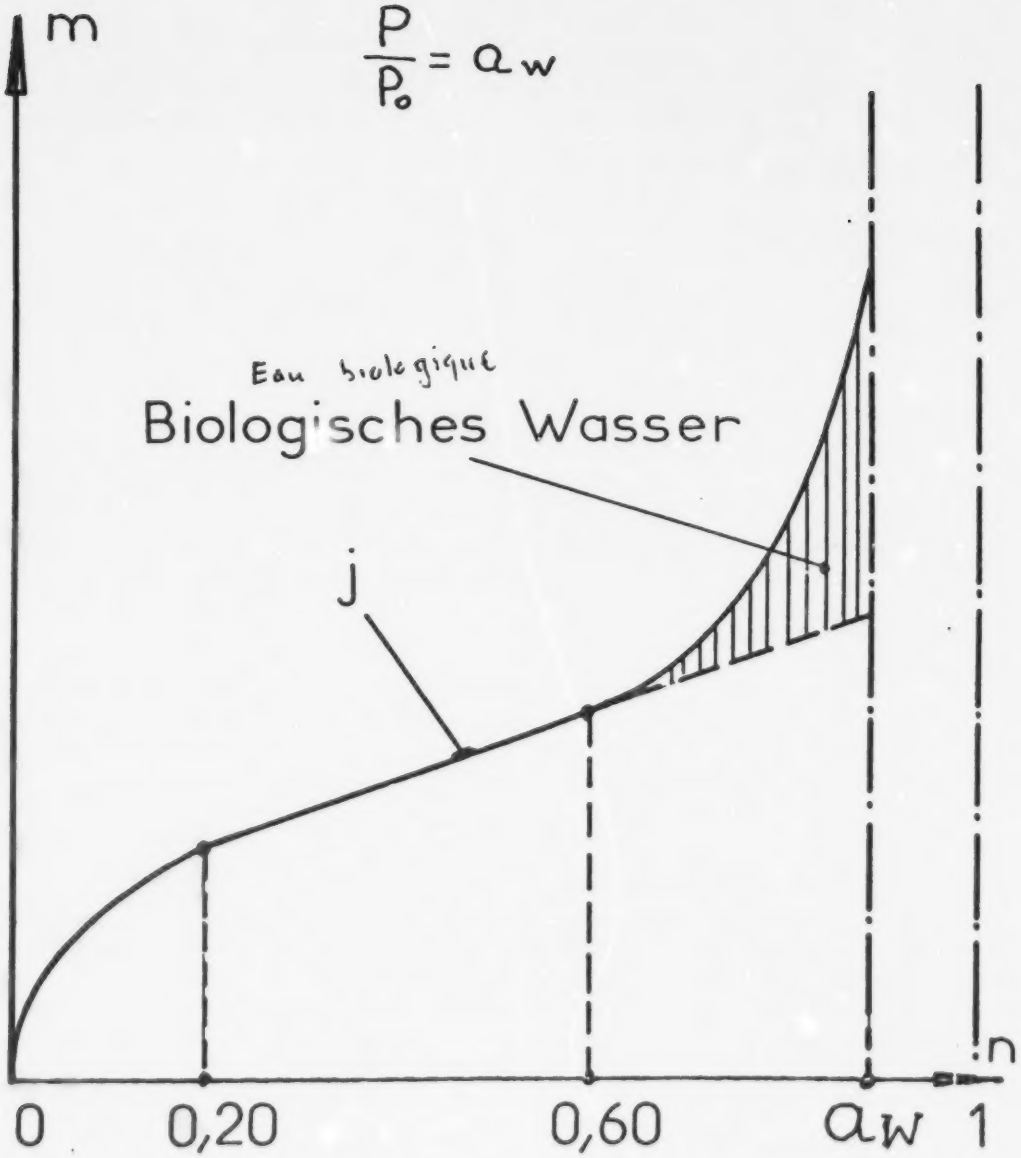
e ≃ = épaisseur du bloc congelé

Acétate 9

COMPARAISON des LIGNES BETTCHER
PORTION CONTROL
AVEC ou SANS GIGATRON BSF

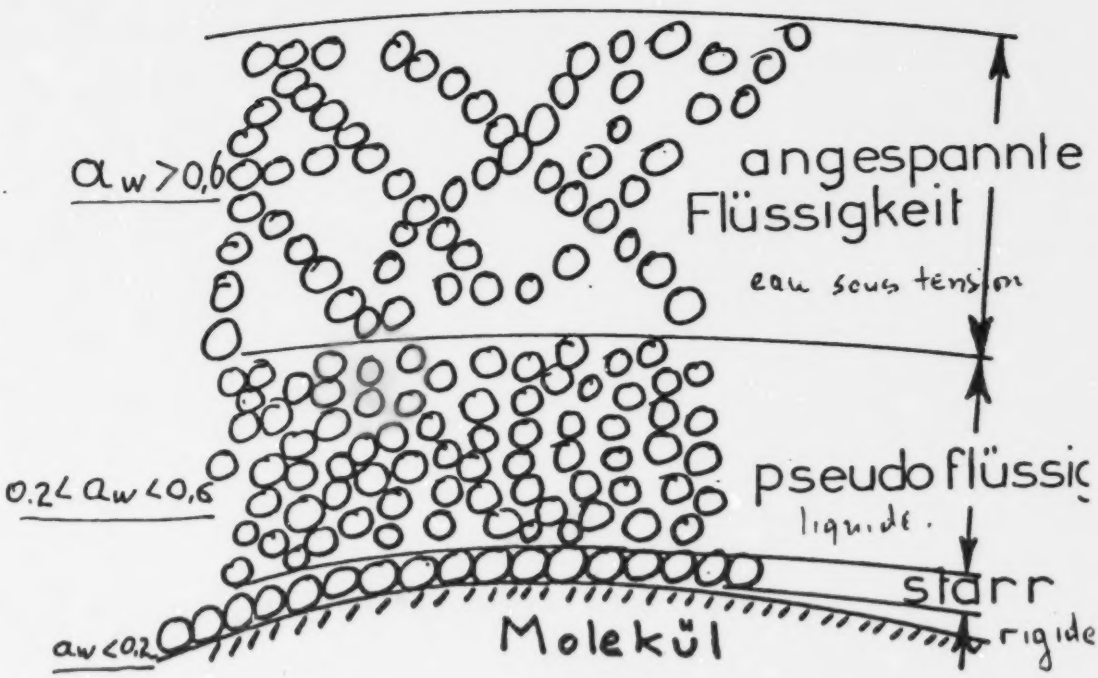
POSTES	SANS GIGATRON	AVEC GIGATRON
Congélation	A - 30°C	Idem
Décongélation à -4°C	Chambre de décongélation avec circulation d'air, durée 48 à 60 H. Oxydation extérieure Dégradation interne Manutentions pour obtenir une décongélation régulière dans la chambre	Durée 10 minutes Aucune oxydation Pas de dégradation Pas de manutention -. Températures régulières
Températures	Très difficile d'obtenir des températures homogènes sinon impossible (-4 à - 8°C)	Températures homogènes
Rendements	Pertes de 3 à 7%	Pertes de 1,5% maximum
Exsudats après décongélation du produit fini	6 à 8%	Négligeable
Immobilisation financière	Importante : 48 à 60 H de production	Pas de stock en cours de décongélation
Flexibilité de fabrication	Non car très grande inertie commerciale : nécessité de stockages intermédiaires et de produits finis prêts	Oui car réponse immédiate à demande commerciale
Pertes en cas de panne	Perte totale du stock en cours de décongélation	Pas de pertes
Aspect	Désagréable : exsudats, couleur oxydée	Aspect du frais
Coûts de recongélation	Elevés par suite de la température plus haute des portions	Bas car les portions restent à une température moyenne de - 4°C, - 3°C
Hygiène	Difficile à maintenir dans des chambres de décongélation à - 4°C	Excellente

Acétate 10



Desorptions-Kurve
(GOMARIN 1974)

Acétate 11



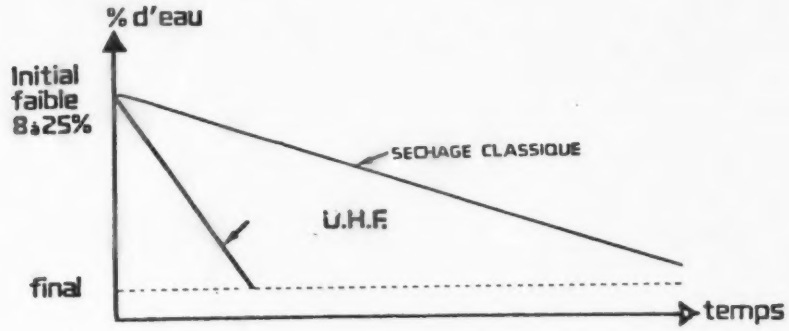
Physischer Wasserstand bei getränktem Substrat

Acétate 12

APPLICATION "SECHAGE"

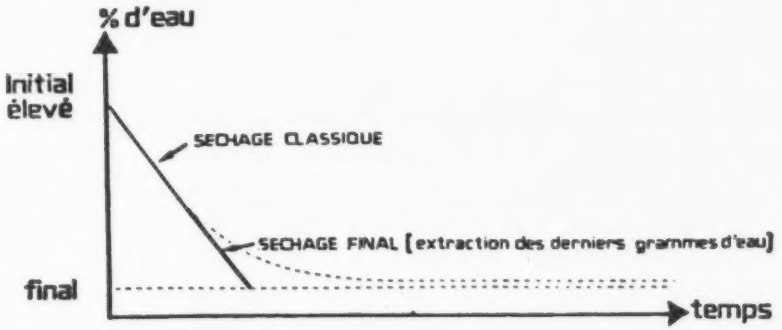
SECHAGE TOTAL

S'ADRESSE AUX PRODUITS DE FAIBLE OU MOYENNE TENEUR INITIALE EN EAU

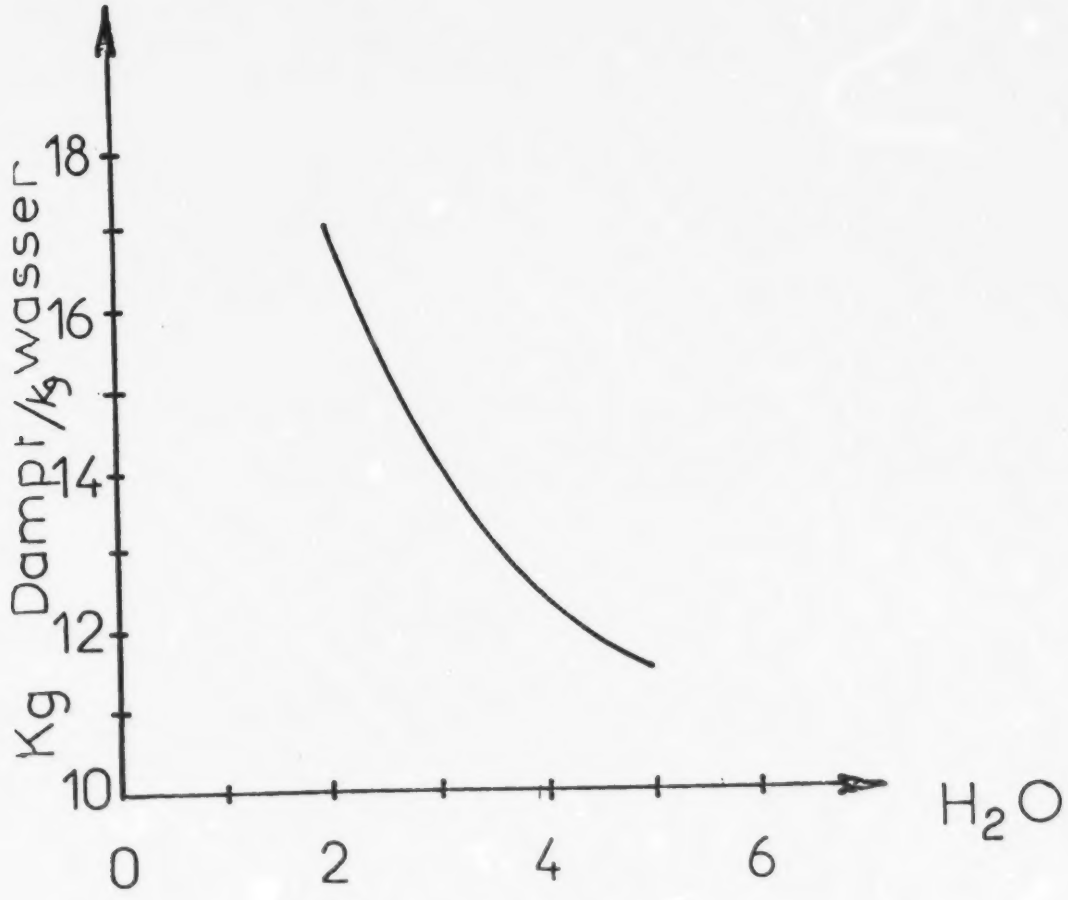


SECHAGE FINAL

S'ADRESSE DANS LES AUTRES CAS (textile, papier...)

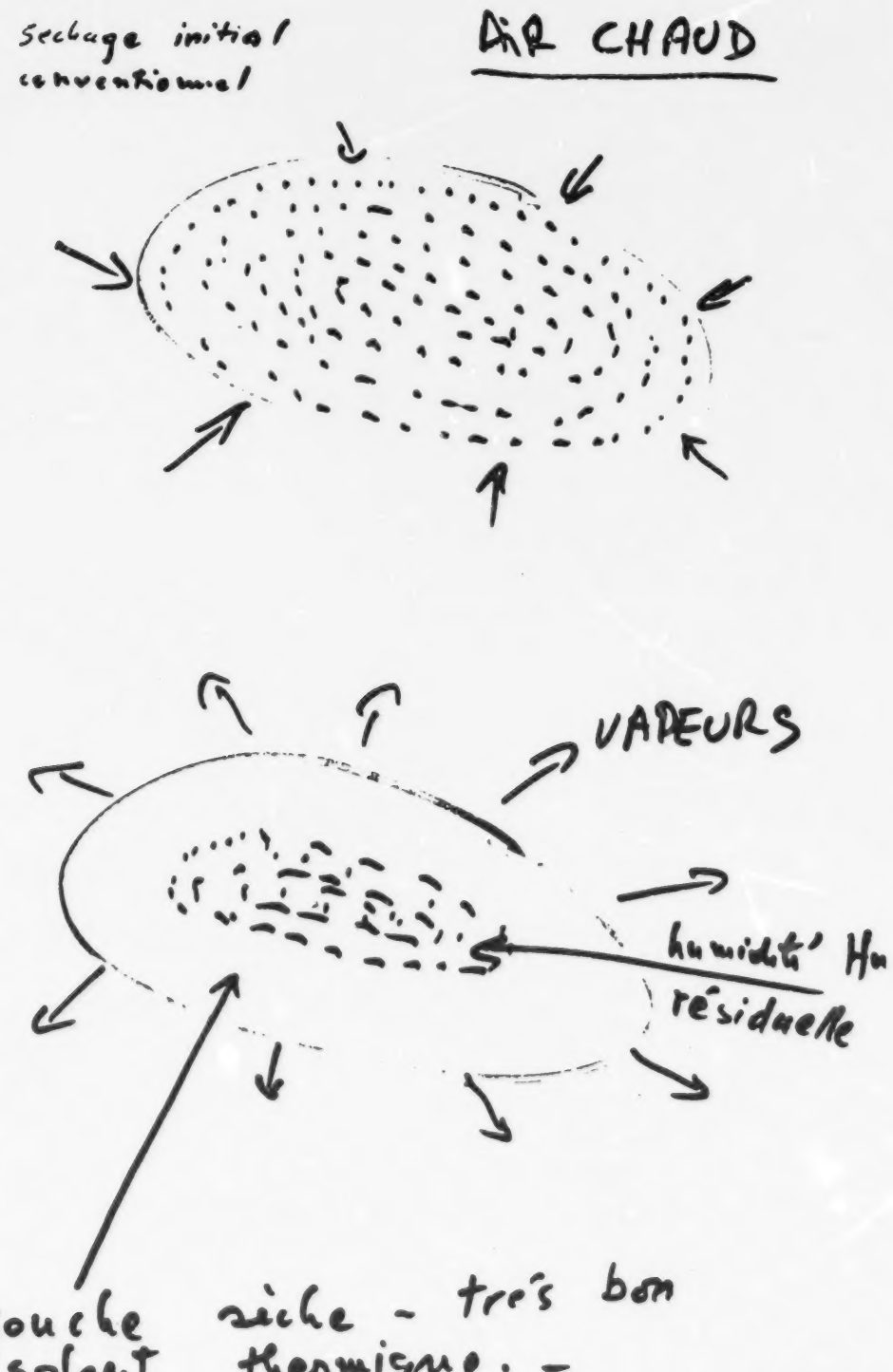


Acétate 13

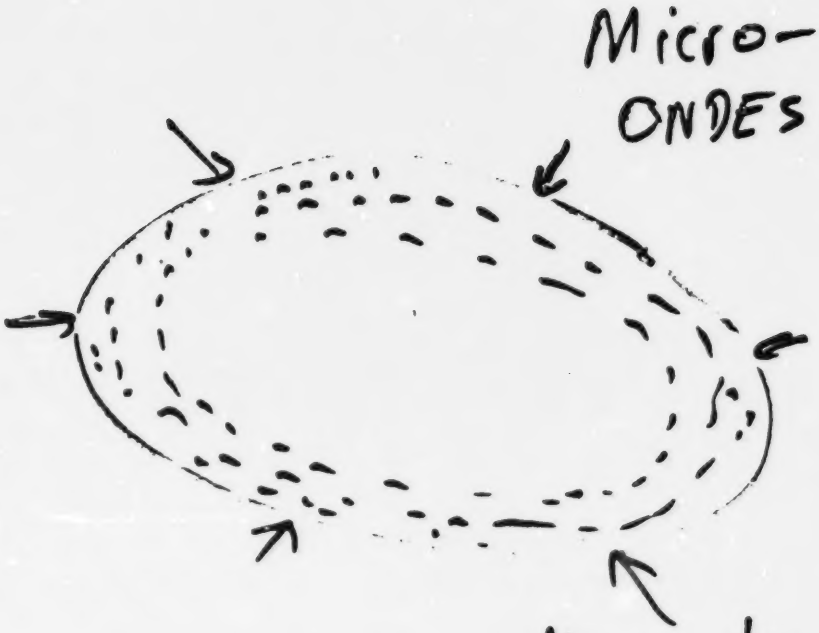


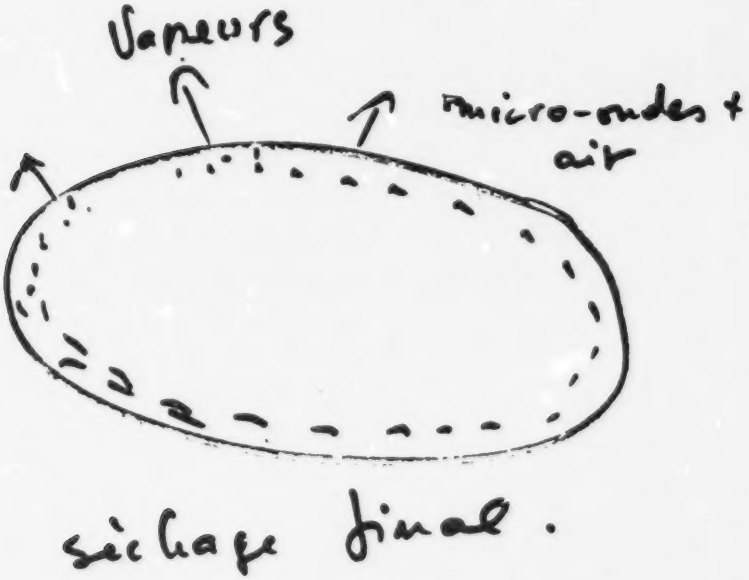
Energieverbrauch bei
Milchtrocknung durch Atomisation
(GOMARIN 1974)

Acétate 14


Séchage initial conventionnel
AIR CHAUD
VAPEURS
humidité Hu résiduelle
couche sèche - très bon isolant thermique. -

Acétate 15


Micro-
ONDES
expulsion de l'eau des
coeurs vers la surface


Vapeurs
micro-ondes +
air
séchage final.

Mme Barbara P. Klein, Ph.D.

Département des aliments et de la nutrition
Université de l'Illinois, Urbana-Champaign

EFFETS DE LA CUISSON ET DU TRAITEMENT AUX MICRO-ONDES SUR LA QUALITÉ DES ALIMENTS

La découverte, il y a 40 ans, des micro-ondes comme moyen de cuisson des aliments a eu des répercussions indirectes sur l'évolution de l'industrie alimentaire. On s'est très vite aperçu qu'elles pouvaient accélérer la cuisson et révolutionner la mise au point des procédés et des produits; mais malgré le vif intérêt suscité par ces nouvelles possibilités, les applications restent rares (tableau 1). La technologie des micro-ondes n'est appliquée qu'à un nombre relati-

vement restreint de produits et certains facteurs limitent son utilisation dans l'industrie alimentaire: tout d'abord, la vitesse de cuisson aux micro-ondes est fonction du volume des aliments; de plus, l'angle de diffusion des micro-ondes dans le four peut donner une cuisson irrégulière et les matériaux de conditionnement ne sont pas parfaits pour ce type de cuisson; enfin, le rééquipement exigé par la nouvelle technologie est très coûteux.

TABLEAU 1

Utilisations industrielles des micro-ondes

1.	Dégel-tempérage des aliments surgelés
2.	Séchage final des amuse-geule
3.	Préparation de spécialités alimentaires (bacon, poulet)
4.	Blanchiment à la vapeur ou aux micro-ondes
5.	Séchage et lyophilisation aux micro-ondes
6.	Stabilisation (beignets) et cuisson aux micro-ondes
7.	Traitement "plurithermique"
8.	Pasteurisation et traitement antiparasites

Le tableau ci-dessus énumère quelques nouvelles façons de procéder à diverses opérations. La dernière en date est le traitement "plurithermique" mis au point par la société suédoise Alfastar. Ce procédé de traitement à température élevée utilise à la fois les micro-ondes et l'énergie thermique. Il permet de stériliser les aliments à macroparticules et de préparer des produits sous emballage plastique ayant une longue durée de conservation avant consommation (Le-Maire, 1985): un sac en plastique est formé, rempli et scellé, puis plongé dans l'eau chaude où il est soumis à

des micro-ondes qui stérilisent son contenu. La vitesse d'exécution par rapport au procédé de mise en boîte ordinaire permet d'obtenir des produits d'excellente qualité. Les autres applications des micro-ondes seront expliquées plus en détail dans les diverses communications de ce colloque.

Alors que les micro-ondes ont donné des résultats assez décevants dans l'industrie alimentaire, elles connaissent un succès étonnant dans l'électroménager. La popularité des fours à micro-ondes a entraîné une forte demande de plats préparés pouvant être réchauffés dans ces appareils. Il faut donc mettre sur la marché des produits sous plastique qui séduisent le consommateur par leur originalité, leur goût et leur prix intéressant.

Nous étudierons certaines des raisons qui expliquent l'attention portée aux micro-ondes par l'industrie alimentaire, les avantages et les inconvénients de ce type de cuisson (sur la base d'études sur la qualité des aliments) et nous verrons comment les fabricants d'emballages ont su s'adapter en mettant au point des matériaux et des systèmes de conditionnement pour fours à micro-ondes.

Tout d'abord, examinons les changements démographiques qui expliquent l'utilisation domestique croissante des fours à micro-ondes (tableau 2).

TABLEAU 2

Raison de la croissance du marché des fours à micro-ondes

1. Augmentation de la population active
2. Augmentation du nombre de couples où les deux conjoints travaillent
3. Augmentation du nombre des foyers à une ou deux personnes
4. Augmentation du nombre de familles monoparentales
5. Augmentation du nombre des retraités (à revenus plus élevés)
6. Nombre croissant d'aliments pour fours à micro-ondes

L'augmentation du nombre de célibataires et de couples sans enfant favorise sans doute la croissance des ventes de fours à micro-ondes et donc des produits conçus pour eux. On estime que près de 50% des habitations au Canada abritent une ou deux personnes seulement. De même, l'augmentation de la population active, la présence marquée des femmes sur le marché du travail, le nombre accru de couples où les deux conjoints travaillent, voilà autant de facteurs qui contribuent à l'expansion de ce marché. Les consommateurs sont prêts à payer plus cher des produits pratiques et "haut de gamme". Ce nouveau courant indique qu'ils disposent de revenus relativement confortables, mais qu'ils ont par contre peu de temps pour choisir et préparer leur nourriture.

La croissance des ventes de fours à micro-ondes a été plus forte que l'indiqueraient (figure 1) les prévisions du début des années 1970 (Anon., 1985a). En 1985, les Américains ont acheté plus de 9,5 millions de fours à micro-ondes, et les

Canadiens plus d'un million. Ces appareils envahissent le marché et leur succès ne se dément pas. Des nouveautés comme les petits fours à faible puissance vendus environ 100 $ stimuleront probablement encore davantage la croissance de ce marché.

L'industrie alimentaire s'intéresse de près à l'usage que les particuliers font de leur appareil (Anon., 1985b). Comme l'indique la figure 2, ils s'en servent surtout pour décongeler les aliments et réchauffer les restes; l'utilisation pour la cuisson est beaucoup moins courante. Si l'on classe dans la même catégorie cuisson des "prêt-à-manger" surgelés et réchauffage des restes, on constate que plus de 70% des utilisateurs accueilleraient favorablement des produits conçus pour ce genre de préparation.

La figure 3 indique que 87,5% des consommateurs cherchent des aliments allant au four à micro-ondes au comptoir des produits surgelés. Cette enquête effectuée par QUICK FROZEN FOODS révèle également que la plupart des consommateurs interrogés trouvent que la qualité et la variété des produits offerts sont bonnes, voire excellentes. Par contre, le prix des produits et la qualité des emballages ont obtenu de moins bonnes notes. Il faut donc sans doute améliorer et élargir encore le marché des produits surgelés pour répondre aux besoins des consommateurs.

Le consommateur apprécie la rapidité et la commodité de la cuisson aux micro-ondes. Mais qu'en est-il de la qualité des aliments? Le recherches effectuées depuis la fin des

années 1940 portent surtout sur la perte de goût et de valeur nutritive des aliments préparés à la maison ou industriellement, puis cuits ou réchauffés aux micro-ondes. Examinons quelques études qui illustrent la façon dont les micro-ondes affectent certaines propriétés des aliments, notamment le poids, le goût et la valeur nutritive des viandes et des légumes. Présenter ces quelques études ne signifie nullement qu'il n'en existe pas d'autres. En fait, le sujet a été abondamment traité et vous voudrez peut-être consulter d'autres ouvrages pour avoir de plus amples détails (Decareau, 1977; Erdman et Erdman, 1982; Klein, 1982; Lorenz, 1976).

La cuisson aux micro-ondes apporte les changements suivants:

1. Les micro-ondes cuisent les aliments rapidement; le goût et l'arôme n'ont donc pas le temps de se développer, ce qui donne des aliments au goût moins délicat.

2. Le brunissage des aliments qui résulte de la caramélisation des sucres n'a pas lieu car la température à la surface des aliments n'est pas assez élevée.

3. La réaction de Maillard (amine-carbonyle) est plus lente, et la température est donc plus basse.

4. La réduction de la durée et des températures de cuisson empêche le collagène des viandes de se ramollir complètement.

5. La dénaturation rapide des protéines peut entraîner le durcissement des viandes.

6. La surface des aliments reste humide car, la température du four demeurant assez basse, il se produit peu d'évaporation.

7. La perte de poids des aliments pendant la cuisson aux micro-ondes est à peu près semblable à celle qu'on peut observer pendant la cuisson traditionnelle.

8. Les viandes cuites aux micro-ondes sont aussi juteuses que les viandes cuites au four ordinaire.

9. Les légumes ont tendance à être plus durs en raison de la décomposition de la structure de la membrane cellulaire.

10. Le blanchiment aux micro-ondes n'est pas très efficace en raison du transfert inégal de la chaleur.

11. La couleur des légumes traités ou cuits aux micro-ondes est plus attrayante que celle des légumes cuits de façon tradionnelle.

12. Les pertes nutritives sont semblables en cuisson traditionnelle et aux micro-ondes; elles dépendent de la durée de la cuisson et de la quantité d'eau utilisée.

13. La cuisson aux micro-ondes est plus rapide et requiert beaucoup moins d'énergie que la cuisson traditionnelle.

L'une des études les plus souvent citées sur les effets de la cuisson aux micro-ondes sur les légumes a été effectuée à l'Université de l'Illinois par Kylen et son équipe dans le laboratoire de Frances Van Duyne (Kylen et al., 1961). Les données du tableau 3 sont tirées de plusieurs études sur la teneur en acide ascorbique et la palatabilité de sept légumes frais et de trois légumes surgelés. La même proportion d'eau et de légumes (une pour deux) a été utilisée dans la cuisson aux micro-ondes et dans la cuisson traditionnelle. On n'a observé pratiquement aucune différence dans la conservation de l'acide ascorbique des aliments frais cuits selon les deux méthodes. Quoique légères, les différences entre les goûts sont significatives. La note inférieure obtenue à cet égard par la cuisson aux micro-ondes est surtout imputable à la perte de texture des légumes. Cependant, les écarts sont dans l'ensemble trop faibles pour avoir une importance pratique.

On observe peu de différence dans le taux de conservation de l'acide ascorbique des légumes blanchis à l'eau bouillante et surgelés, et cuits ensuite selon les deux méthodes (tableau 4). On remarquera que ce taux est calculé par rapport à la teneur en acide ascorbique des légumes crus et qu'une grande partie de la perte a lieu au cours du blanchiment. Il est intéressant de noter que les légumes surgelés cuits aux micro-ondes ont obtenu une note de goût plus élevée; il vaut donc mieux blanchir les aliments de façon traditionnelle et les cuire aux micro-ondes.

Le tableau 5, résumé d'un certain nombre d'études, montre que la durée de cuisson et la quantité d'eau utilisée jouent un rôle crucial dans la conservation de l'acide ascorbique des légumes. On notera en particulier que faire bouillir les légumes à grande eau entraîne une perte de vitamine C presque deux fois plus élevée que les cuire aux micro-ondes.

Schrumpf et Charley (1975) ont trouvé que la cuisson aux micro-ondes donnait des légumes beaucoup moins tendres que la cuisson traditionnelle (figure 4). Cette différence n'est pas due à des changements chimiques dans la structure des légumes; elle semble plutôt liée à la perte d'eau ou à la déshydratation, puisque les légumes cuits aux micro-ondes perdent plus de poids que les légumes cuits de façon traditionnelle (tableau 6). La déshydratation est due à l'affaissement des vacuoles cellulaires et au repli de la paroi cellulaire. On a observé les même phénomènes lors de micrographies électroniques de carottes et de brocolis cuits aux micro-ondes.

Les effets de la cuisson aux micro-ondes sur la perte de valeur nutritive de la viande ne sont pas uniformes, comme l'indique le tableau 7. Parmi les vitamines B étudiées dans les viandes, la thiamine est la plus labile à la chaleur, et sa conservation est affectée à la fois par la durée et par la température de cuisson. Cependant, bien que les durées de cuisson au four à micro-ondes soient plus courtes, on ne note pas de différences significatives sur ce point entre les deux méthodes de cuisson.

TABLEAU 3

Effets de la méthode de cuisson sur les légumes crus

Légume	Méthode de cuisson	Conservation de la vitamine C	Palatabilité
Brocoli	Traditionnelle	83	20,3
	Micro-ondes	79	19,4**
Chou	Traditionnelle	69	21,7
	Micro-ondes	72	21,7
Chou-fleur	Traditionnelle	92	22,9
	Micro-ondes	87	21,6**
Épinards	Traditionnelle	61	21,8
	Micro-ondes	56	21,4

** Écart significatif à partir de 1%.
Kylen et al., J. Amer. Diet. Assn., 39, 1961, p. 321.

TABLEAU 4

Effets de la méthode de cuisson sur les légumes surgelés

Légume	Méthode de cuisson	Conservation de la vitamine C+	Palatibilité
Brocoli	Traditionnelle	48	22,4
	Micro-ondes	52	23,3*
Haricots verts	Traditionnelle	30	19,7
	Micro-ondes	30	20,9
Épinard	Traditionnelle	22	22,8
	Micro-ondes	26	23,0

+ Sur la base de la teneur en acide ascorbique des aliments crus avant surgélation.
* Écart significatif à partir de 5%.
Kylen et al., J. Amer. Diet. Assn., 39, 1961, p. 321.

TABLEAU 5

Effet de quelques méthodes de cuisson courantes sur la conservation de l'acide ascorbique des légumes

Légume et méthode de cuisson	Proportion eau/légume	Durée de cuisson (en min)	Conservation de l'acide absorbique en %
Brocoli			
Micro-ondes	2/1	3	72
Casserole (ébullition)	2/1	10	59
Micro-ondes	0,4/1	5	87
Casserole (ébullition)	5,5/1	6,5	45
Casserole	0,5/1	10	88
Cuisson sans eau	0,2/1	8	82
Chou			
Micro-ondes	0/1	5	93
Micro-ondes	3,5/1	4	85
Casserole (ébullition)	4/1	25	20
Cocotte-minute	1,25/1	3	50
Micro-ondes	0,25/1	4	80
Casserole (ébullition)	0,5/1	6,5	38
Micro-ondes	0,5/1	12	72
Casserole (ébullition)	0,5/1	14	69
Épinards			
Micro-ondes	0/1	7	56
Casserole	0/1	7	61
Micro-ondes	0,25/1	6,5	47
Casserole	0,25/1	7	50

Source : Erdman et Klein, 1982.

TABLEAU 6

Perte de poids des légumes pendant la cuisson

Légumes	Cuisson aux micro-ondes	Cuisson traditionnelle
Carottes	34,2	15,7
Brocoli	26,8	11,0

Schrumpf et Charley, J. Food Sci., 40, 1975, p. 1025.

Une étude sur des rôtis d'intérieur de ronde cuits aux micro-ondes et de façon traditionnelle a souligné certaines différences entre eux (Voris et Van Duyne, 1979). Comme l'indique le tableau 8, la durée de cuisson et la consommation d'énergie sont beaucoup plus élevées dans la cuisson traditionnelle, mais la plupart des autres caractéristiques sont similaires. C'est le manque de saveur, d'arôme et de coloration extérieure des viandes cuites aux micro-ondes qui explique la note légèrement inférieure à la rubrique "goût". Selon d'autres études telles que celle effectuée par Costello et al. (1985) sur les biftecks reconstitués (tableau 9), il existe des différences importantes, surtout en ce qui concerne la perte de poids durant la cuisson et le goût des aliments. Les viandes cuites aux micro-ondes sont moins juteuses et plus dures, probablement en raison de la dénaturation des protéines et du ramollissement moindre du collagène dus à la cuisson plus rapide.

L'industrie alimentaire devra prendre en considération ces changements dans la qualité des aliments lors de la mise au

point de produits à cuire ou réchauffer au four à micro-ondes. Les effets des traitements industriels aux micro-ondes sur la qualité des aliments n'ont guère été étudiés, mais on peut présumer qu'il est tout aussi difficile d'obtenir des produits de haute qualité.

Les caractéristiques propres aux micro-ondes exigent des contenants alimentaires bien particuliers. Dans la présente étude, nous nous concentrerons sur les types de matériaux d'emballage qui jouent un rôle important dans la commercialisation des produits alimentaires allant au four à micro-ondes. Le conditionnement des aliments "pour micro-ondes" pose des problèmes inhabituels à l'industrie alimentaire et aux fabricants d'emballages. Le tableau 10 indique les impératifs à respecter en matière de boîtes ou d'emballages d'aliments surgelés. Le premier, c'est la commodité: les consommateurs veulent que leur four à micro-ondes réduise la durée de cuisson, mais aussi le travail de nettoyage et le service. C'est pourquoi la plupart des emballages allant au four à micro-ondes peuvent passer directement de l'étagère au four et du four à la table. Le métal - matériau dominant du conditionnement traditionnel - n'est pas compatible avec les fours à micro-ondes. Il a donc fallu mettre au point toute une nouvelle gamme d'emballages et de matériaux (tableau 11).

Les sacs en plastique sont utilisés depuis maintes années; nous n'en parlerons donc pas. Les contenants allant au four sont aujourd'hui les plus populaires, et le dernier matériau lancé avec succès est le polyester thermodurci. Le moléthy-

TABLEAU 7

Conservation des vitamines dans les viandes
(en pourcentage)

Viande	Méthode de cuisson	Thiamine	Riboflavine	Niacine
Rôti de boeuf	M.-O.	63	84	73
	C.T.E.	75	90	81
	M.-O. 1	61	98	94
	M.-O. 2	49	83	86
	C.T.G.	69	99	106
Rôti de porc	M.-O. 1	73	81	87
	M.-O. 2	67	82	79
	C.T.G.	72	96	101
Rôti d'agneau	M.-O.	57	75	--
	C.T.G.	54	84	--
	M.-O. 1	52	88	71
	M.-O. 2	49	73	64
	C.T.G.	52	98	86
Poitrine de dinde	M.-O.	79	86	--
	C.T.G.	79	92	--

M.-O. = Micro-ondes
C.T. = Cuisson traditionnelle
C.T.E. = Cuisson traditionnelle à l'électricité
C.T.G. = Cuisson traditionnelle au gaz

TABLEAU 8

Rôtis cuits aux micro-ondes
et de façon traditionnelle

	Cuisson aux micro-ondes	Cuisson traditionnelle
Durée de cuisson (min/lb)	18,5	33,3**
Consommation d'énergie (kWh)	0,86	1,40**
Perte de poids totale (%)	26,9	26,1
Perte de jus (%)	9,9	7,7*
Évaporation (%)	17,0	18,5
Teneur en thiamine (mg/100 g)	0,095	0,096
Palatabilité	22,2	24,5*
Résistance au tranchage	8,4	7,5

Voris et Van Duyne, J. Food Sci., 44, 1979, p. 1447.

TABLEAU 9

Effet de la cuisson aux micro-ondes
sur des biftecks reconstitués

	Cuisson aux micro-ondes	Cuisson traditionnelle
Perte de poids totale (%)	35,0	29,8
Résistance au tranchage de Warner Bratzler (kg)	2,2	2,5
Résistance à la pénétration (kg)	1,5	1,3
Broyage - mastication (kg)	0,54	0,47
Aspect	102	70
Tendreté	52	42
Masticabilité	79	64
Évaporation d'eau	55	75

Costello et al., J. Food Sci., 50, 1985, p. 685.

lène téréphtalate (PETP) sert à fabriquer deux types de plats pouvant aller au four. Les plats en PETP thermodurci épais, formés d'une coquille en PETP remplie de carbonate de calcium et de fibres de verre, sont utilisés comme emballage pour les repas surgelés "gastronomiques" ou "haut de gamme". Ils sont solides, esthétiques et peuvent être réutilisés. Malgré leur coût assez élevé (20¢ par plat), ils ont largement contribué au succès des plats cuisinés relativement onéreux (ceux du "Menu" par exemple). Les plats en PETP thermodurci peuvent également aller au four traditionnel, ce qui est un atout supplémentaire.

On trouve aujourd'hui une version moins coûteuse de ces plats: des contenants en PETP thermoformé léger sont fabriqués avec des feuilles produites par co-extrusion et revêtues de polyéthylène téréphthalate cristallisé. Ce matériau avait l'inconvénient de se casser facilement et de ramollir à la chaleur. Ces problèmes ont été résolus en modifiant les techniques de production et en ajoutant du polymère pour renforcer le matériau. Le coût des plats en PETP thermoformé devrait être moins élevé que celui des plats thermodurcis; ils se présentent en outre en grande variété de formes et sont plus faciles à remplir et à sceller. On les scelle avec une pellicule pouvant aller au four à micro-ondes comme au four traditionnel. Les compagnies aériennes américaines utilisent actuellement des plats en PETP thermoformés car, selon elles, ils offrent un meilleur contrôle de la température, et sont plus légers et plus esthétiques que les emballages qu'elles employaient auparavant. La marque

Swanson essaie elle aussi la nouvelle formule pour ses plats cuisinés actuellement présentés dans des plateaux d'aluminium.

Le carton pouvant aller au four est considérablement moins cher que le PETP. Il peut être soumis aux micro-ondes et façonné en de nombreuses formes de tailles différentes (Peters, 1981). Comme son poids et son épaisseur sont plus ou moins comparables à ceux de l'aluminium, son utilisation n'exigera sans doute pas de grands remaniements technologiques. Le carton est fabriqué directement avec de la pâte à papier et on peut lui donner l'épaisseur voulue; il doit être ensuite enduit pour ne pas absorber la graisse et l'humidité des aliments. Les revêtements les plus courants sont le polyester ou le PETP, le polypropylène, le silicone et l'oxyde de titane, utilisés seuls ou en combinaison pour certains produits. Actuellement, de nombreux produits surgelés sont présentés dans des plats en carton pouvant aller au four. Mais le carton a un gros inconvénient: il ne va pas au four traditionnel. En ffait, la marque "Banquet" déconseille vivement de le mettre au four grille-pain, probablement parce que la chaleur pourrait brûler le carton.

Le matériau n° 1 du plat cuisiné - l'aluminium - ne convient pas à la cuisson aux micro-ondes. Non qu'il soit totalement incompatible; mais les fabricants déconseillent le métal dans les fours à micro-ondes, car des étincelles, si elles jaillissent pourraient endommager le magnétron. On estime que, dans cinq ans, moins de 10% des produits surgelés seront vendus dans des emballages en aluminium alors que plus

de 50% le sont actuellement. Pour conserver sa part du marché, ALCOA a mis au point des barquettes en aluminium enduit lisses, arrondies et non plissées, ce qui réduit le risque d'étincelles (Anon., 1984; 1985c). Le "revêtement organique" (à matrice de vinyle ou d'époxy) absorbe une partie des micro-ondes, diminuant d'autant leur réflexion. Un dôme en plastique qui empêche la barquette de toucher les parois du four réduit également le risque d'étincelles. Lors d'essais effectués par Schiffman Associates (mise au four de barquettes avec et sans nourriture), on a constaté que l'aluminium, enduit ou non enduit, n'entraînait pas de dommages sur le magnétron. L'aluminum enduit ne coûte que 20% de plus que l'aluminum ordinaire. Comme sa conductibilité thermique est excellente, il permet en outre de réaliser des économies d'énergie au stade du traitement et de la congélation.

Les types d'emballage dont nous avons parlé jusqu'à présent sont tous conçus pour des aliments surgelés, et vont indifféremment au four à micro-ondes et au four traditionnel. Certains contenants sont conçus spécialement pour des produits - soupe, pop-corn ou pizza - exigeant un conditionnement particulier. Par exemple, dans le cas des soupes, on utilise volontiers la boîte. Bien que certains plastiques puissent résister aux températures d'un autoclave et au brassage des aliments, il n'est pas si simple de concevoir un contenant pouvant être scellé tout en restant facile à ouvrir. La maison Campbell a essayé de nombreux contenants mais n'a pas encore trouvé celui qui lui convient vraiment; elle en a pourtant lancé quelques-uns à titre d'essai, notamment le bol en PETP thermoformé (Anon., 1985d). Outre

le problème du traitement, les contenants doivent s'ouvrir facilement car tout mélange de liquides et de solides doit être remué lorsqu'on le réchauffe au four à micro-ondes. Un contenant en plastique scellé par un couvercle métallique à anneau et doté d'un couvercle en plastique a été mis à l'essai dans une chaîne d'épicerie fine aux États-Unis. Bien que ce couvercle laisse à découvert une étroite bande de métal, il s'agit là, semble-t-il, d'un inconvénient très mineur. On trouve aussi sur le marché des contenants spéciaux pour les haricots au chili et les ragoûts (Forcinio, 1984): des cannelures facilitent la cuisson par formation de courants de convexion dans le liquide.

TABLEAU 10

Emballages pour fours à micro-ondes

EMBALLAGE POUR ALIMENTS SURGELÉS
- Commodes, faciles à servir - Résistent à des températures allant de -40 °F/°C à 400 °F/205 °C - Ne risquent pas d'altérer les aliments ou d'abîmer le four - Relativement peu chers
BOITES
- Commodes, faciles à ouvrir - Peuvent aller dans un autoclave, supportent le brassage des aliments - N'occasionnent pas de perte de qualité - Se conservent au moins un an en magasin

TABLEAU 11

Types d'emballages pour cuisson aux micro-ondes

1. Sachets de cuisson

2. Barquettes allant au four
   - Plastique
   - Aluminium
   - Carton

3. Emballages spéciaux
   - Bols à soupe
   - Boîtes à maïs
   - Boîtes à pizza

Le maïs éclaté pour four à micro-ondes est très populaire aux États-Unis. On vend du maïs à éclater surgelé dans des sacs extensibles (en plastique ou en papier) ainsi que du maïs éclaté tout emballé qui se conserve à la température ambiante. L'un des emballage les plus intéressants est peut-être la boîte en carton pliée qui se déploie quand le maïs éclate et forme alors un bol (Forcinio, 1983).

Le réchauffage de la pizza pose des problèmes particuliers. Les plats cuisinés à taux d'humidité élevé ne deviennent pas croustillants dans un four à micro-ondes; ils ont tendance au contraire à en ressortir mous et spongieux. La pizza pour four à micro-ondes est préparée pour cet appareil, et vendue dans un emballage spécial qui sert aussi à la cuisson. Le plat en carton peut être retourné lors de la mise au four. Il est revêtu d'une feuille de polyester métallisé et laminé sur papier. La surface métallisée renvoie une partie de la chaleur sur le fond de la pizza, ce qui aug-

mente la température et permet à la croûte de brunir. La croûte elle-même a été conçue pour être réchauffée aux micro-ondes et une forme spéciale a été mise au point pour permettre à l'humidité de s'évaporer.

Presque tous les matériaux d'emballage pour fours à micro-ondes ont été utilisés antérieurement sous une forme ou une autre. Bien que pouvant aller au four à micro-ondes, les contenants en verre sont extrêmement sensibles aux chocs thermiques et à la cavitation (Shapiro et Bayne, 1982). Cependant, le remplissage à chaud éliminerait dès l'usine les contenants défectueux, réduisant ainsi les risques d'éclatement dans le four. L'emploi de couvercles métalliques détachables et d'étiquettes non métalliques rendrait ces contenants tout à fait utilisables. Il faudrait toutefois les manipuler avec précautions car ils chaufferaient au contact des aliments.

Tous ces matériaux ne sont pas parfaits. Certains plastiques absorbent l'huile. Tel ou tel plastifiant risque de passer dans les aliments. Certains contenants peuvent fondre ou se briser si leur température et celles des aliments sont plus élevées que prévu. Les encres utilisées sur les contenants peuvent se vaporiser et dégager une odeur désagréable. Les spécialistes de l'emballage sont conscients de ces problèmes, mais aucune étude sérieuse n'a encore été effectuée.

Le conditionnement des aliments représente un investissement important pour l'industrie alimentaire; dans le secteur des

aliments pour fours à micro-ondes, il peut représenter un atout commercial important. Il est essentiel de poursuivre la mise au point des produits et des emballages pour répondre à la demande des consommateurs qui veulent des produits de haute qualité, faciles à préparer et conçus pour ce type de four. La généralisation de ces fours entraînera une augmentation régulière du nombre de produits offerts sur le marché. Les aliments haut de gamme ont besoin d'un emballage de qualité pour justifier leur prix de vente relativement élevé. A l'heure actuelle, les plats et repas surgelés sont pour l'industrie alimentaire, les spécialistes de l'emballage et les compagnies de fours à micro-ondes l'occasion rêvée de créer ensemble des produits qui sauront séduire les consommateurs. De nouveaux produits sont continuellement lancés sur le marché et la concurrence reste donc vive.

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier monsieur D. Kay Cooksey pour l'aide qu'il m'a apportée dans ma recherche d'ouvrages de référence pour préparer cet exposé.

OUVRAGES DE RÉFÉRENCES

Anon., "Aluminum packaging system designed for microwave ovens", Prepared Foods, 153 (Aug.), 1984b, p. 36.

Anon., "High tech packaging puts FF on high road", Quick Frozen Foods, 48(2), 1984a, p. 10.

Anon., "Microwaves and frozens: Good marriage of convenience", Quick Frozen Foods, 48(2), 1984b, p. 20.

Anon., "Alcoa 'can't wait' to unveil microwavable aluminium trays", Quick Frozen Foods, 47(1), 1985c, p. 44.

Anon., "Thermoformed bowl introduces frozen soup entree", Food & Drug Packaging, 49(3), 1985d, p. 5.

Costello, C.A., Penfield, M.P. et Riemann, M.J., "Quality of restructured steaks: Effects of days on feed, fat level, and cooking method", J. Food Sci., 50, 1985, P. 685.

Decareau, R.V., "Do microwaves make food more nutritious?", Microwave Energy Applications Newsletter, 10(2), 1977, p. 13.

Erdman, J.W., Jr. et Erdman, E.A., "Effect of home preparation practices on nutritive value of food", dans Handbook of Nutritive Value of Processed Food, vol. I, Rechcigl, M. Jr., éd. CRC Press, Inc., Boca Raton, FL., 1982, p. 237-264.

Forcinio, H., "Microwavable package grows as popcorn pops", Food & Drug Packaging, 47(3), 1983, p. 5.

Forcinio, H., "Food heats two ways in microwavable bowl", Food & Drug Packaging, 48(2), 1984, p. 1.

Klein, B.P., "Effect of processing on nutritive value of food: Microwave cooking", dans Handbook of Nutritive Value of Processed Food, vol. I, Rechcigl, M., Jr., éd. CRC Press, Inc., Boca Raton, FL., 1982, p. 209-236.

Klein, B.P., "Losses of nutrients during processing of foods", Communication Paper 82-6503, présentée au congrès de l'American Society of Agricultural Engineers (hiver 1982).

Kylen, A.M., Charles, V.R., McGrath, B.H., Schleter, J.M., West, L.C. et Van Duyne, F.O., "Microwave cooking of vegetables", J. Am. Diet. Assoc., 39, 1961, p. 321.

Lorenz, K., "Microwave heating of foods. Changes in nutrient and chemical composition", CRC Crit. Rev. Food Sci. Nutr., 7, 1976, p. 339.

Peters, J.W., "Ovenable board matures, refines focus on user needs", Package Engineering, 26(10), 1981, p. 57.

Schrumpf, E. et Charley, H., "Texture of brocoli and carrots cooked by microwave energy", J. Food Sci., 40, 1975, p. 1025

Shapiro, R.G. et Bayne, J.F., "Microwave heating of glass containers", Food Technol., 46(2), 1982, p. 46.

Voris, H.H. et Van Duyne, F.O., "Low wattage microwave cooking of top round roasts", J. Food Sci., 44, 1979, p. 1447.

FIGURES

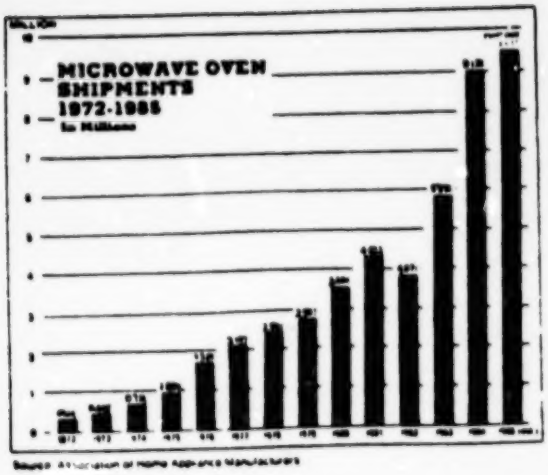


Fig. 1. Oven Sales

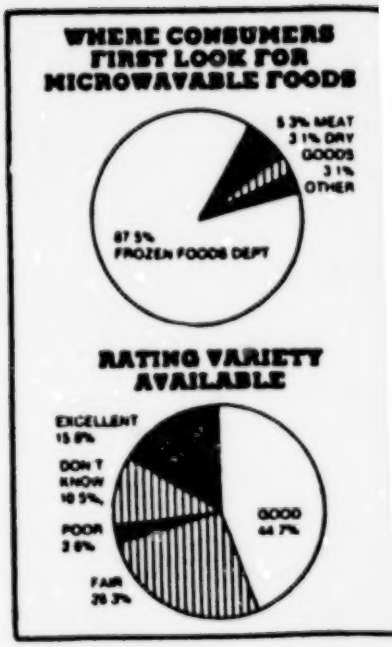


Fig. 3

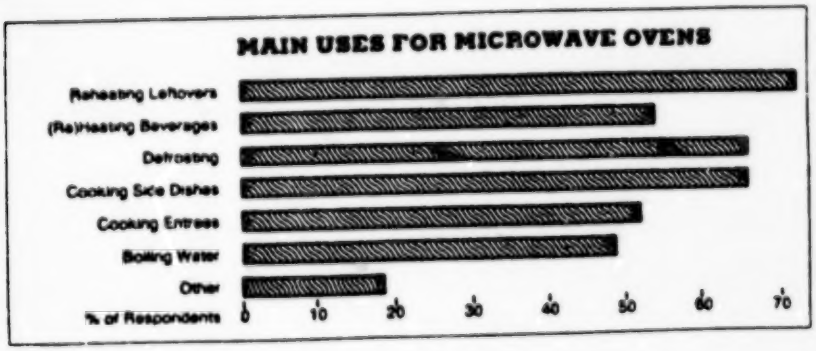


Fig. 2. Uses for Ovens

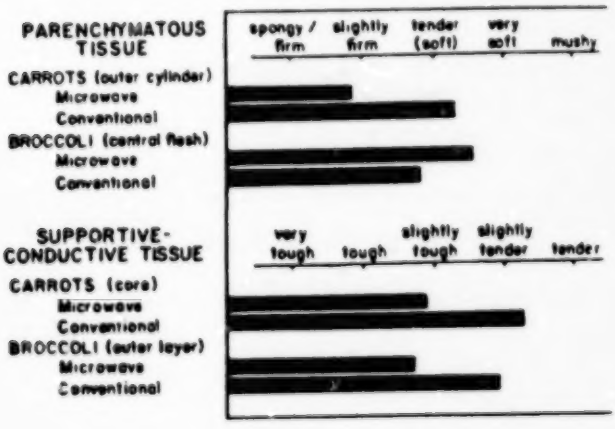


Fig. 4–*Average ranks for tenderness of broccoli and carrot tissue*

FIGURES

**LIVRAISONS DE FOURS
À MICRO-ONDES
1972-1985
(en millions)**

Source: Association des fabricants d'appareils ménagers

Fig. 1. Ventes de fours à micro-ondes

PRINCIPALES UTILISATIONS DES FOURS À MICRO-ONDES

Réchauffer des restes
Chauffer ou réchauffer des boissons
Décongeler
Cuire des plats d'accompagnement
Cuire des plats de résistance
Faire bouillir de l'eau
Autres
% d'utilisateurs

Fig. 2. Utilisations des fours à micro-ondes

**OÙ LES CONSOMMATEURS
CHERCHENT-ILS LES ALIMENTS
POUR FOURS À MICRO-ONDES?**

5,3% Comptoir des viandes
3,1% Denrées non périssables
3,1% Autres rayons

87,5%
Comptoir des produits surgelés

**ÉVALUATION DU CHOIX
D'ALIMENTS**

EXCELLENT
15,9%
SANS OPINION
10,5%
MÉDIOCRE
2,6%
MOYEN
26,3%
BON
44,7%

Fig. 3

FIGURES (Suite)

TISSUS PARENCHYMATEUX	Spongieux/ fermes	Légèrement fermes	Tendres	Très tendres	En bouillie
CAROTTES (couche extérieure)					
Cuisson aux micro-ondes					
Cuisson traditionnelle					
BROCOLI (partie centrale)					
Cuisson aux micro-ondes					
Cuisson traditionnelle					

TISSUS RIGIDES FAITS DE FAISCEAUX CONDUCTEURS	Très durs	Durs	Légèrement durs	Plutôt tendres	Tendres
CAROTTES (partie centrale)					
Cuisson aux micro-ondes					
Cuisson traditionnelle					
BROCOLI (couche extérieure)					
Cuisson aux micro-ondes					
Cuisson traditionnelle					

Fig. 4. Évaluation moyenne de la tendreté du brocoli et des carottes

M. Robert Bellavoine

Directeur, S.F.A.M.O.

APPLICATION DES MICRO-ONDES DANS LE DOMAINE INDUSTRIEL ET AGRO-ALIMENTAIRE

ÉQUIPEMENT EXISTANT ET ÉVOLUTION FUTURE

Si nous faisons référence aux caractéristiques des micro-ondes à la fréquence de 2 450 MHz, en tant que transfert d'énergie, nous pouvons retenir, entre autres:

- Absence d'inertie, tant au démarrage qu'à l'arrêt.

- Pénétration au coeur du produit.

- Sélectivité, fonction du facteur de perte.

- Propagation dans des atmosphères différentes (chaude, froide, sous vide, sous pression).

- Rapidité.

Ces caractéristiques font des micro-ondes un moyen de transfert d'énergie différent, et suivant le but recherché lors d'un traitement thermique d'un corps mauvais conducteur de la chaleur, c'est une de ces caractéristiques, ou plusieurs d'entre elles qui seront mises en exploitation.

L'examen rapide de chacune de ces caractéristiques fait apparaître:

Par l'absence d'inertie: la possibilité de cycle thermique précis, de travail séquentiel, et une consommation d'énergie uniquement en présence du produit, d'où économie par rapport aux techniques traditionnelles.

Par la pénétration au coeur du produit: possibilité d'élever la température d'un corps en son centre en même temps que sa périphérie, et ceci sans faire appel à une température extérieure supérieure à celle souhaitée, dans le produit, supprimant de ce fait les effets de surchauffe ou de croûtage.

Par l'action sélective: fonction du facteur de perte, c'est-à-dire en schématisant que certaines parties du produit suivant sa composition pourront s'élever plus vite en température que d'autres, et que, par ailleurs, l'action des micro-ondes étant prépondérante sur les molécules d'eau, cette caractéristique sera mise à profit pour les opérations de séchage ou de déshydratation.

Par cette notion de sélectivité, certains corps, téflon, polypropylène, etc. sont insensibles à l'action des micro-ondes et pourront donc servir soit de contenant, de sole, etc. sans pour autant gêner l'action des micro-ondes sur le produit à traiter.

Par la propagation dans des atmosphères différentes: Il est possible de faire agir des micro-ondes sur un produit dans des enceintes sous air chaud, air froid, sous vide ou en pression, la mixité pouvant accélérer par exemple un processus, économiser de l'énergie ou permettre des températures supportables sur le produit.

Par la rapidité: des cycles de traitement en technique traditionnelle peuvent être réduits par micro-ondes dans des rapports de 1 à 100, voire plus; il est possible de changer des procédés de fabrication en intégrant au vu des temps courts pouvant être obtenus, la notion d'automatisme.

Enfin, et découlant dans une certaine mesure des points cités ci-dessus, les économies d'énergie: celles-ci peuvent se situer au niveau de l'exploitation dans son ensemble

(absence de préchauffage, consommation uniquement en présence du produit) ou au niveau du bilan énergétique pur pour une opération thermique donnée.

Ces différents points nous semblent les plus significatifs des possibilités des micro-ondes, sans oublier pour autant la réduction des encombrements, l'absence de pollution, la souplesse d'emploi.

Dans le domaine agro-alimentaire, les micro-ondes sont plus particulièrement destinées actuellement pour des appareils de séchage ou de déshydratation, pour des appareils de cuisson ou de précuisson, pour la pasteurisation et la stérilisation, et dans certains cas, la décongélation.

Dans la plupart de ces applications, l'aspect qualitatif est celui qui prime pour l'emploi des micro-ondes, suivi de la notion de rapidité permettant des automatismes.

Dans le domaine industriel, les micro-ondes sont particulièrement adaptées pour résoudre le problème du chauffage des corps isolants et mauvais conducteurs de la chaleur (caoutchouc, résine, fibre de verre, etc.).

Nous sommes persuadés que les domaines d'application sont très importants et nous pensons que la prise en compte des caractéristiques rappelées ci-dessus peut déboucher sur des procédés nouveaux et très performants, et nous ne pouvons que souhaiter que, lors d'un projet d'utilisation des micro-ondes par une industrie, **celui-ci puisse être élaboré le**

plus tôt possible dans l'engineering car les retombées en amont et en aval peuvent **être très importantes** si les paramètres sont **intégrés tôt dans l'étude,** et que, d'autre part, ce projet puisse être établi en **complète harmonie** et dès le départ, entre:

- L'industriel qui connaît son produit et ses contraintes d'exploitation.

- Le laboratoire spécialisé en micro-ondes qui pourra assurer certains essais et mesures.

- Le constructeur, qui, connaissant les contraintes de fabrication liée à cette technologie, et les contraintes d'exploitation de l'industriel utilisateur, pourra assurer l'industriel de la reproductibilité des résultats obtenus en laboratoire, et assurer l'extension du procédé à un stade industriel.

Pour imager cet exposé, il sera fait état d'un assez grand nombre de réalisations S.F.A.M.O., aussi bien dans le domaine alimentaire qu'industriel.

- Séchage de viande de poule, cuisson de betteraves, déshydratation de légumes, décongélation, polymérisation de résine liant les fibres de verre dans les produits d'isolation, préchauffage des ébauches de caoutchouc, séchage et fusion de cosmétiques...

Il va de soi qu'au niveau industriel, la mise en oeuvre des micro-ondes s'effectue avant tout sous forme de tunnel pour le traitement en continu du produit.

Les différentes diapositives présentées démontrent que sur le plan industriel, les micro-ondes sont une réalité, et que des installations importantes sont en service.

Le souci du constructeur est avant tout de pouvoir rationaliser et standardiser ses fabrications ou tout au moins proposer à sa clientèle une **gamme de matériel modulable,** tant au niveau de la puissance micro-ondes qu'au niveau des sous-ensembles constituant une ligne de fabrication.

Un point également très important est le souci de rendre cette technologie simple d'emploi et de mise en oeuvre par l'intégration d'automate, de microprocesseur, de détecteur, etc., supprimant les risques au niveau exploitation.

La technologie micro-ondes actuellement a recours au niveau production des micro-ondes à des émetteurs (magnétrons) qui sont des pièces d'usure. Ceci sous-entend un remplacement périodique, et notre société, sur ce point, a mis au jour une technologie de générateurs micro-ondes, qui peuvent être remplacés en cours de fonctionnement, et dont le magnétron peut être remplacé par le service d'entretien classique d'une usine, rendant l'industriel maître de sa maintenance et ceci dans un domaine de pointe.

Notre société a estimé que pour la pénétration du marché des micro-ondes, il fallait avant tout, en dehors des problèmes de conception, de construction qui doivent répondre à des impératifs tels que solidité et fiabilité, respect des normes, etc., s'attacher à résoudre les problèmes d'exploitation, de maintenance, tout en rendant le matériel simple et aisé à ces niveaux.

Mme M.A. Stuchly

Bureau de la radioprotection
Santé et Bien-être social Canada

LES RÈGLES DE SÉCURITÉ APPLICABLES À L'UTILISATION DE LA TECHNOLOGIE DES MICRO-ONDES DANS L'INDUSTRIE ALIMENTAIRE

Introduction

Les micro-ondes peuvent avoir des effets biologiques dans les cas d'exposition à des doses suffisamment élevées. De nombreuses interrogations ont été soulevées récemment concernant le caractère sécuritaire des diverses technologies utilisant cette forme d'énergie.

L'objet du présent article est de passer en revue les effets biologiques des micro-ondes et de décrire les normes de protection et les règles de sécurité applicables à leur utilisation.

La biophysique de l'interaction

L'énergie quantique des fréquences micro-ondes est très faible, de sorte qu'elle ne peut modifier la structure intramoléculaire, ni rompre les liaisons intermoléculaires.

L'interaction des rayonnements de micro-ondes et des organismes vivants, notamment les être humains, constitue un phénomène complexe qui met en cause un grand nombre de facteurs. Les réactions biologiques sont dues aux champs électromagnétiques situés à l'intérieur du corps biologique plutôt que dans les champs externes. Les propriétés électriques et la géométrie de l'organisme vivant déterminent la quantité de rayonnements réfléchis, transmis et absorbés pour un champ d'exposition donné (1). Le champ d'exposition se caractérise par la fréquence, l'intensité, la polarisation et le type, par exemple, onde plane, champ limitrophe (fuites), champ proche d'une antenne.

L'unité dosimétrique essentielle à la quantification des interactions des rayonnements non ionisants et des corps biologiques est appelée taux d'absorption massique (TAM). Le TAM est défini comme le taux auquel l'énergie est absorbée par unité de masse tissulaire. Le taux d'absorption

massique est exprimé en watts par kilogramme. Il est important de tenir compte non seulement du taux moyen d'absorption massique de l'ensemble du corps biologique, mais aussi des TAM locaux (la répartition) dans toutes les parties du corps.

Le taux moyen d'absorption massique dépend de la fréquence et de la polarisation des rayonnements. L'absorption maximale se produit lorsque le corps est parallèle au champ électrique. Le TAM maximal survient à une certaine fréquence que l'on appelle la fréquence de résonance du corps entier. Dans le cas de l'homme moyen, cette fréquence est environ 70 MHz, tandis que pour un jeune enfant, elle se situe à environ 250 MHz. Le TAM moyen dépend aussi de la taille et de la forme du corps biologique (2).

Le TAM à la fréquence de résonance diffère selon la taille du corps: Les petits corps absorbent plus d'énergie que les corps plus volumineux (1,2). Le TAM moyen dépend aussi du plan horizontal de base et des autres objects se trouvant à proximité. De plus, la répartition du TAM dans les différentes parties du corps humain ou animal est très peu uniforme.

L'énergie électromagnétique absorbée est transformée en chaleur au moyen de plusieurs mécanismes d'interaction moléculaire, comme la rotation des molécules polaires (eau, protéines, acides aminés), la polarisation de la charge d'espace menant à la relation de Maxwell-Wagner et à la conduction ionique. Du point de vue biologique, on doit tenir

compte non seulement de l'augmentation de température produite par cette opération ou, le cas échéant, du taux de dissipation de la chaleur (au moyen de mécanismes thermorégulateurs), mais aussi, pour certains types d'interactions, du taux de variation de la température.

On peut distinguer deux types d'interactions biophysiques des radiofréquences. Le premier type comprend les interactions thermiques au sens large, c'est-à-dire les effets dus à des augmentations substantielles de température, ainsi que certains effets qui ne s'accompagnent pas d'une hausse de température mesurable. Les interactions thermiques produites par les radiofréquences diffèrent à plusieurs points de vue des autres interactions impliquant de l'énergie thermique. Le taux de rétention d'énergie, la non-uniformité de l'échauffement, en particulier l'existence possible de gradients élevés dans le taux de rétention d'énergie au niveau moléculaire, constituent les principaux facteurs de spécificité de ces interactions. On sait beaucoup de choses sur les interactions thermiques, mais de nombreuses questions demeurent sans réponse, notamment la non-uniformité spatiale de l'absorption d'énergie à la suite de l'exposition à divers appareils (par exemple émetteurs portatifs et mobiles), les répercussions biologiques de cette non-uniformité, la non-uniformité possible au niveau moléculaire et cellulaire. Le second type d'interactions provient des rayonnements de micro-ondes dont l'intensité est faible ou très faible et qui sont modulés en amplitude à des fréquences extrêmement basses (généralement entre 1 et 100 Hz, mais aussi parfois à des fréquences plus élevées). Il semble que ces interactions

se produisent principalement au niveau des membranes cellulaires. Dans ce cas, la preuve expérimentale des interactions est convaincante, mais les mécanismes en cause demeurent énigmatiques.

Les effets biologiques

Un grand nombre d'expérience ont été effectuées sur des animaux afin de déterminer les dangers potentiels de l'exposition à des rayonnements électromagnétiques non ionisants. Plusieurs études détaillées ont été publiées récemment (3-8). Malheureusement, la fiabilité d'un grand nombre des premières expériences effectuées dans ce secteur a été réduite par la faible qualité de la dosimétrie utilisée. Le fait que l'on n'ait pas suffisamment reconnu l'importance des rapports complexes entre la dose et le champ d'exposition, ajouté à un manque de connaissances concernant les données dosimétriques quantitatives, lors des premiers travaux expérimentaux dans les pays de l'Ouest et même dans les travaux récents en Union soviétique et dans les pays de l'Est, a eu pour conséquence de diminuer considérablement la valeur des résultats de ces expériences. Néanmoins, les progrès accomplis en dosimétrie au cours des dernières années ont ouvert de nouvelles voies permettant d'effectuer des recherches plus rigoureuses sur les effets biologiques des radiofréquences et micro-ondes.

Les effets thermogènes des rayonnements électromagnétiques sont probablement les mieux connus, et ils ne diffèrent pas

des autres effets thermiques, si ce n'est quant aux "point chaud" et aux taux d'échauffement dont il a été question plus haut. Les principales manifestations physiologiques du stress thermique consistent en l'activation du système neuro-endocrinien ainsi que du système nerveux autonome affectant le comportement et la motricité, de même qu'en des changements morphologiques. Des signes visibles de stress thermique apparaissent lorsqu'un animal est exposé à un taux d'absorption massique égal à son taux de métabolisme basal (TMB). Une déviation sensible de la température rectale des animaux exposés se produit à des taux d'absorption massique d'énergie de radiofréquences équivalent à 3 - 3 TMB. Dans le cas d'un TAM inférieur au TMB, on observe divers types d'effets sur le comportement, les glandes endocrines, l'hématologie et l'immunisation, ainsi que des changements cardiaques et respiratoires, qui constituent des réactions physiologiques à un stress thermique modéré (8).

On a constaté expérimentalement que les taux d'absorption massique inférieurs à la moitié du TMB stimulent le système thermorégulateur, provoquant la vasodilatation dans la queue et les pattes du singes, sans aucun accroissement de la température du corps. L'analyse des données expérimentales portant sur des animaux a permis de conclure que l'activation du mécanisme thermorégulateur du corps humain se produit à environ 20% à 25% du TMB, ce qui équivaut à un TAM de 0,25 à 0,75 W/kg selon l'âge et la taille de la personne (8).

Les effets des rayonnements de micro-ondes sur l'oeil, notamment les effets cataractogènes, ont été étudiés en détail

(4-6). Les fréquences les plus susceptibles de produire des cataractes se situent entre 800 MHz et 10 GHz. Il est claire qu'il existe, au niveau de l'intensité du champ d'exposition (TAM) et de la durée de l'exposition, un seuil au-delà duquel des cataractes sont provoquées par une seule exposition ou plusieurs expositions consécutives. Dans le cas d'une seule exposition aiguë d'une durée de plus d'une heure, le seuil est de 100 mW/cm^2. Par exemple, dans le cas des lapins exposés à une fréquence de 2,45 GHz, une intensité de 150 mW/cm^2 pendant 100 minutes est requise pour produire des cataractes. Les effets cumulés d'expositions multiples se manifestent à des niveaux inférieurs au seuil déterminé pour l'exposition unique; mais ils comportent aussi leur propre seuil d'intensité. Par exemple, à 2,45 GHz, 4 lapins sur 10 sont atteints de cataracte à la suite de 18 à 32 périodes quotidiennes d'exposition d'une durée d'une heure à 150 mW/cm^2; par contre, aucun cas de cataracte n'a été relevé à la suite de 20 périodes quotidiennes d'exposition à une intensité de 75 mW/cm^2 et une fréquence de 2,45 GHz pendant 8 heures par jour, 5 jours par semaine, s'étendant sur des périodes de 8 à 17 semaines, n'a entraîné aucun changement oculaire anormal dans les trois mois suivant l'exposition.

Des études des effets des rayonnements sur la tératogenèse des mammifères ont démontré qu'il existe un rapport dose - réaction entre les effets et la dose absorbée. Seuls les champs intenses qui produisent un échauffement considérable provoquent de façon certaine des cas de tératogenèse (8). La durée de l'exposition semble jouer un rôle important

quant à la réaction biologique. L'effet le plus fréquent de l'exposition aux radiofréquences, même aux doses les plus faibles, est la réduction du poids du corps, qui persiste, sous forme de rachitisme, jusqu'à la maturité. On a observé chez les rats et les souris des déformations comme l'exencéphalie et le cranioschisis à des doses plus élevées. L'augmentation du taux de résorption des foetus est un autre effet nuisible de l'exposition aux radiofréquences.

Les effets tératogènes semblent survenir en fonction de seuils dont la valeur n'est toutefois pas établie pour tous les effets et toutes les fréquences. Le degré de réaction aux radiofréquences dépend du taux d'absorption d'énergie, de la durée de l'exposition, du moment de l'exposition par rapport au cycle de gestation, ainsi que des espèces en cause.

Divers changements dans les systèmes hématologique et immunologique ont été observés chez des animaux exposés à des champs de radiofréquences, mais n'ont pas entraîné d'accroissement de la température du corps. Les échauffements localisés et les "points chauds" semblent influencer les réactions immunologiques. L'effet le plus fréquent est l'augmentation du taux de formation et d'activité des lymphocytes. Certaines études ont démontré une réaction accrue des lymphocytes, tandis que d'autres ont indiqué le contraire (8).

Il n'existe pas de preuve expérimentale convaincante que les radiofréquences, à moins d'être modulées à des fréquences

extrêmement basses, affectent les systèmes hématopoïétique et immunologique de façon directe, autrement que par les effets thermiques. Les réactions sont similaires à celles résultant du stress thermique.

Les effets de l'exposition aux micro-ondes sur le système nerveux central et sur le comportement constituent la question la plus controversée dans le domaine des effets biologiques des rayonnements de radiofréquences. En U.R.S.S. et dans certains pays d'Europe de l'Est, on a soutenu que l'exposition à des rayonnements de faible fréquence (fréquemment appelés "non thermiques") entraînait des troubles neurasthéniques réversibles.

L'exposition à des impulsions courtes à puissance de crête élevée mais à faible densité de puissance moyenne, peut provoquer le phénomène de "l'audition des micro-ondes". Cet effet auditif est produit par un mécanisme thermoacoustique semblable à celui qui permet la perception normale des sons et dont l'emplacement d'interaction principal se trouve dans la région de la cochlée.

L'exposition aiguë et chronique des animaux à des rayonnements de micro-ondes à intensité suffisamment élevée peut causer des altérations morphologiques du système nerveux.

Le comportement est le plus sensible des paramètres à étudier dans la recherche des effets des radiofréquences sur les animaux. Des changements du comportement locomoteur ont été relevés à des taux d'absorption d'énergie relativement

bas (TAM = 1,2 W/kg). Des altérations du rendement opérant ont été observées à des taux environ deux fois plus élevés. Les champs pulsés semblent affecter le comportement de façon plus marquée que les champs d'ondes continues. Le seuil de perturbation du comportement se situe à un taux d'absorption des radiofréquences variant entre 25% et 50% du taux de métabolisme basal de l'animal. Les altérations de comportement sont réversibles avec le temps (8).

Il est difficile d'évaluer les effets de l'exposition des êtres humains aux micro-ondes, en raison de l'insuffisance des données recueillies jusqu'à maintenant. Les études portant sur les êtres humains exposés aux micro-ondes par leur travail comportent des limites importantes. La quantification de l'exposition individuelle est peu fiable en raison du manque d'instruments adéquats comme les dosimètres. Dans la presque totalité des études connues, les conditions d'exposition n'ont pas été définies, et il est impossible d'évaluer certains paramètres essentiels comme la densité de puissance moyenne et la durée de l'exposition, la surface d'irradiation, etc., pour chaque travailleur sur une période de plusieurs années. Généralement, le seul paramètre connu est la gamme des densités de puissance des rayonnements auxquels un travailleur peut avoir été exposé. Une autre difficulté provient du rôle joué par d'autres facteurs environnementaux et par les conditions socio-économiques. Pour démontrer un lien quelconque entre une maladie et l'exposition aux micro-ondes, il est nécessaire d'observer un grand nombre d'individus, de façon à obtenir des données épidémiologiques significatives d'un point de vue statistique, faute

de quoi, d'autres facteurs environnementaux risquent d'influencer l'étude. Jusqu'à maintenant, aucune étude épidémiologique n'a fourni de preuve fiable concernant les effets nuisibles de l'exposition professionnelle aux radiofréquences et micro-ondes. L'étude la plus fiable a été réalisée sur des vétérans de la Guerre de Corée (8). On n'a constaté aucune différence au niveau de la mortalité et de la morbidité. De même, l'étude de personnel de l'ambassade américaine à Moscou n'a démontré aucune différence dans l'état de santé des personnes exposées et non exposées. Cependant, le degré d'exposition était très faible. Les études tchécoslovaques et soviétiques peuvent être considérées comme des rapports cliniques plutôt que des études épidémiologiques. Il est difficile de juger si les effets relevés sont attribuables aux radiofréquences ou à d'autres facteurs professionnels.

Récemment, on a prétendu, dans certains rapports, que l'exposition à des champs électriques et magnétiques entraîne une augmentation du taux de leucémie. Cependant, ces données comportent des incohérences et il s'agit, dans la plupart des cas, d'exposition à des champs de 60 Hz et non pas à des champs de micro-ondes.

Normes de sécurité

Afin de protéger la population contre la sur-exposition à l'énergie des micro-ondes, des normes obligatoires et volontaires ont été édictées dans la plupart des pays. Ces

normes se divisent généralement en deux groupes: les normes d'exposition et les nombres d'émissions. Par norme d'exposition, on entend le niveau d'exposition maximal du corps entier ou d'une partie du corps. La norme d'émission se rapporte à un appareil (par exemple, un four à micro-ondes) et précise le niveau maximal d'émission (fuite de rayonnements) à une distance déterminée. Le niveau maximal de fuite est généralement établi de façon à ce que l'exposition qui en résulte soit très inférieure à la norme d'exposition. Les normes d'émission des produits et d'exposition du personnel visent à protéger le grand public et les travailleurs mais ne s'appliquent pas à l'utilisation de l'énergie des micro-ondes à des fins de diagnostic et de thérapie médicale (par exemple, la diathermie par micro-ondes), en ce qui concerne le patient.

Il existe de fortes divergences d'opinion quant aux motifs et facteurs servant de fondement aux niveaux recommandés dans les normes d'exposition des divers pays de l'Ouest et de l'Est (6). Dans certains pays, dont le Canada et la Suède, des normes nationales obligatoires ont été établies; dans d'autres pays, comme les États-Unis, on s'est limité à des recommandations. Des recommandations sont également faites par des organismes internationaux comme l'organisation mondiale de la santé (OMS) et la Commission électrotechnique internationale (CEI). Le tableau 1 contient un résumé des normes d'exposition et des recommandations applicables aux micro-ondes. Ces limites visent l'exposition continue (tenant compte d'une journée de 8 heures pour l'exposition professionnelle). L'exposition à des champs d'in-

tensité plus élevée est permise par toutes les normes dans les cas d'exposition professionnelle. Les normes et recommandations les plus récentes, comme celles du Canada, de l'ANSI et de l'OMS, décrivent le raisonnement utilisé dans la détermination des limites. Dans tous les cas, ces limites sont basées sur des effets biologiques bien précis, potentiellement dangereux, et les conditions d'exposition sont mises en corrélation avec le taux d'absorption d'énergie (taux d'absorption massique, TAM) (7).

Parmi les nombreux appareils conçus pour des usages industriels, scientifiques, médicaux et domestiques, les fours à micro-ondes, industriels ou domestiques, sont réglementés dans la plupart des pays de l'Ouest; certaines des normes sont résumées au tableau 2. On a démontré que l'exposition aux rayonnements provenant des fuites d'un four à micro-ondes est extrêmement faible. Par exemple, dans le cas d'un four laissant échapper 5 mW/cm^2 à 5 cm de sa surface externe, à une distance de 1,8 m, le niveau d'exposition est de 5 W/cm^2 (9,10). Des enquêtes portant sur les fours aux États-Unis (9,10) et au Canada (11) ont indiqué que la réglementation est respectée et que les fuites sont de loin inférieures aux limites dans le cas de nombreux modèles.

L'Institut international de l'énergie micro-onde a élaboré une norme volontaire applicable à l'équipement industriel (12). Un maximum de 10 mW/cm^2 à une distance de 5 cm a été établi pour l'équipement fonctionnant à une charge minimale.

Afin de vérifier si les normes d'exposition et d'émission sont respectées, il est nécessaire de mesurer les champs de micro-ondes. Ces champs peuvent être mesurés au moyen de divers instruments vendus sur le marché, ils consistent généralement en un détecteur et un compteur. Le détecteur peut comprendre trois (deux dans certains cas) éléments dipôles orthogonaux ou trois bouches magnétiques orthogonales. Le courant des micro-ondes est redressé par une diode ou un couple thermoélectrique à la fin du dipôle ou de la bouche. Le courant redressé est transporté par des conducteurs à haute résistance jusqu'aux circuits de traitement des signaux et d'affichage du compteur. Cette conception réduit au minimum la perturbation du champ mesuré et la saisie de signaux micro-ondes par les conducteurs. L'utilisation de trois éléments directifs dans le détecteur rend sa réaction directive isotrope. Un détecteur à deux dipôles est adéquat pour mesurer les fuites de fours à micro-ondes étant donné les propriétés caractéristiques des fentes, dont proviennent les fuites de rayonnements.

Pour évaluer le champ d'exposition situé près d'un appareil, il est généralement nécessaire de mesurer à la fois l'intensité du champ électrique et celle du champ magnétique puisque ces champs ne sont plus alors en corrélation conformément à l'impédance dans le vide (377Ω). Ces mesures doivent être prises soigneusement en tenant compte de divers facteurs, comme l'ont montré certains auteurs (13).

Un grand nombre d'appareils simples et économiques ont été conçus et mis sur le marché afin de permettre la détection

des fuites provenant des fours à micro-ondes (14, 15). Cependant, la grande majorité d'entre eux sont tout à fait inadéquats et peu fiables; ils fournissent des données erronées, causant ainsi de fausses alarmes au lieu de déceler les vrais problèmes (14).

Dans les cas d'application des micro-ondes où de fortes quantités d'énergie sont utilisées, même en lieu clos, il existe une possibilité de fuite par les ouvertures d'accès (par exemple, le cas d'un four à micro-ondes équipé d'un convoyeur). Pour la conception de systèmes de ce genre, il est important de tenir compte des aspects relatifs à l'exposition potentielle. Toutes les installations devraient être vérifiées et des règles de fonctionnement établies, de sorte que l'exposition au champ de micro-ondes soit réduite au minimum et demeure en deçà des limites prescrites par les normes.

Tableau 1
Normes d'exposition

PAYS	NORME ET DATE	TYPE	GAMME DES FRÉQUENCES	LIMITES D'EXPOSITION
Canada	Norme fédérale 1979 Santé et Bien-être social Canada	Profes-sionnel	10-1000 MHz	1 mW/cm^2 60 V/m 0,16 A/m
			1-300 GHz	5 mW/cm^2 140 V/m 0,36 A/m
		Grand public	0,01 - 300 GHz	1 mW/cm^2 60 V/m 0,16 A/m
Suède	Norme nationale 1976 Ministère du Travail	Profes-sionnel	10 - 300 GHz	5 mW/cm^2
			0,3 - 300 GHz	1 mW/cm^2
Royaume-Uni	Recommandations 1971, Medical Research Council		0,03 - 300 GHz	10 mW/cm^2
États-Unis	Recommandations 1982 Am. National Standard Inst. (ANSI)	Profes-sionnel et grand public	30 - 300 MHz	1 mW/cm^2 4000 V^2/m^2 0,025 a^2/m^2
			300-1500 MHz	(f/300) mW/cm^2
			1,5 - 100 GHz	5 mW/cm^2 20 000 V^2/m^2 0,125 A^2/m^2

Tableau 1
Normes d'exposition
(Suite)

PAYS	NORME ET DATE	TYPE	GAMME DES FRÉQUENCES	LIMITES D'EXPOSITION
Conseil des communautés européennes	Recommandations proposées en 1980	Professionnel et grand public	0,3 - 300 GHz	10 mW/cm^2
Association internationale pour la protection contre les radiations	Recommandations proposées en 1980	Professionnel	10 - 1000 MHz	1 mW/cm^2 60 v^2/m^2 0,16 A/m
			1 - 300 GHz	5 mW/cm 140 C/m 0,35 A/m

Tableau 2
Normes d'émission applicables
aux fours à micro-ondes

PAYS	ORGANISME	ANNÉE	LIMITES
Canada	Ministère de la Santé et du Bien-être social	1974	1 mW/cm^2 à 5 cm pour les fours neufs
États-Unis	Department of Health and Human Services	1971	1 mW/cm^2 à 5 cm pour les fours neufs 5 mW/cm^2 à 5 cm pour les fours usagés
Royaume-Uni	British Standards	1976	5 mW/cm^2 à 5 cm
Japon		1970	5 mW/cm^2 à 5 cm
CEI	CEI	1976	5 mW/cm^2 à 5 cm

Références

1. Stuchly, M.A. (1979) "Interaction of radiofrequency and microwave radiation with living systems". Rad. Environ. Biophys., 16, 1-14.

2. Durney, C.H. (1980) "Electromagnetic dosimetry for models of humans and animals: A review of theoretical and numerical techniques". Proc. IEEE, 68, 33-40.

3. Aey, W.R. (1981) "Tissue interactions with nonionizing electromagnetic fields". Phys. Rev. 61, 435-513.

4. Cleary, S.F. (1977) "Biological effects of microwave and audiofrequency radiation". CRC Rev. Environ. Control, 121-166.

5. Michaelson, S.M. (1980) "Microwave biological effects: An overview". Proc. IEEE. 68, 40-49.

6. Stuchly, M.A. (1979) "Health aspects of radiofrequency and microwave radiation exposure". Publication de Santé et Bien-être social Canada 78-EHD-22.

7. Tell, R.A. et F. Harlen (1979) "A review of selected biological effects and dosimetric data useful for development of radiofrequency safety standards for human exposure". J. Microwave Power, 14, 405-424.

8. Elder, J. et D. Cahill, (Eds)

9. Osepchuk, J.M. (1979) "A review of microwave oven safety". J. microwave Power, 13, 13-26.

10. Osepchuk, J.M. (1979) "A review of microwave oven safety". Microwave J. 22(5), 25-35.

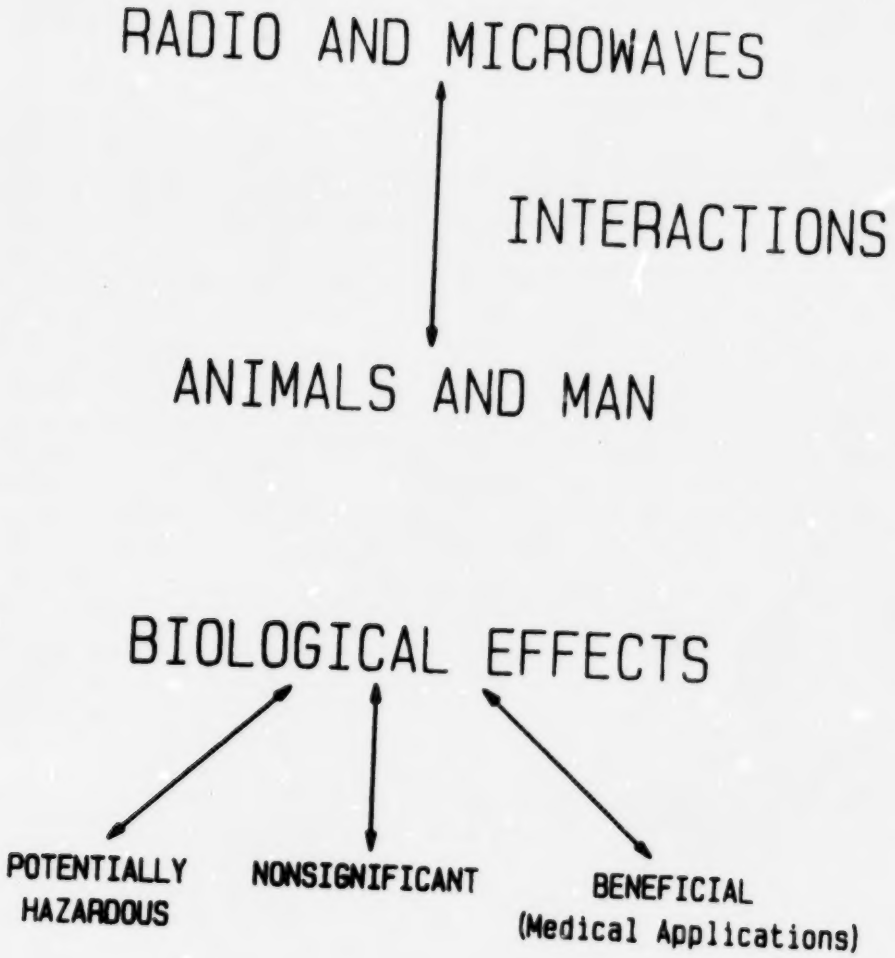
11. Stuchly, M.A., Repacholi, M.H. et Lecuyer, D. (1979) "The impact of regulations on microwave ovens in Canada". Health Physics, 37, 137-144.

12. "Safety from microwave hazards in using microwave power equipement - an IMPI policy statement", (1975) J. Microwave Power, 14, 333-341.

13. Wacker, P.F. et Bowman, R.R. (1971) "Quantifying electromagnetic fields: scientific basis and practical considerations". IEEE Trans., MTT-19, 178-187.

14. Bojsza, W.J. (1980) "Oven testers: Ineffective instruments or a potential gold mine?", Microwaves 19(3), 15-16.

15. Voss, W.A.G. et Turner, R. (1982) "Performance of a liquid-crystal microwave oven leakage indicator", J. Microwave Power, 17, 39-49.


RADIO AND MICROWAVES
INTERACTIONS
ANIMALS AND MAN
BIOLOGICAL EFFECTS
POTENTIALLY HAZARDOUS
NONSIGNIFICANT
BENEFICIAL (Medical Applications)

S A R

SPECIFIC ABSORPTION RATE

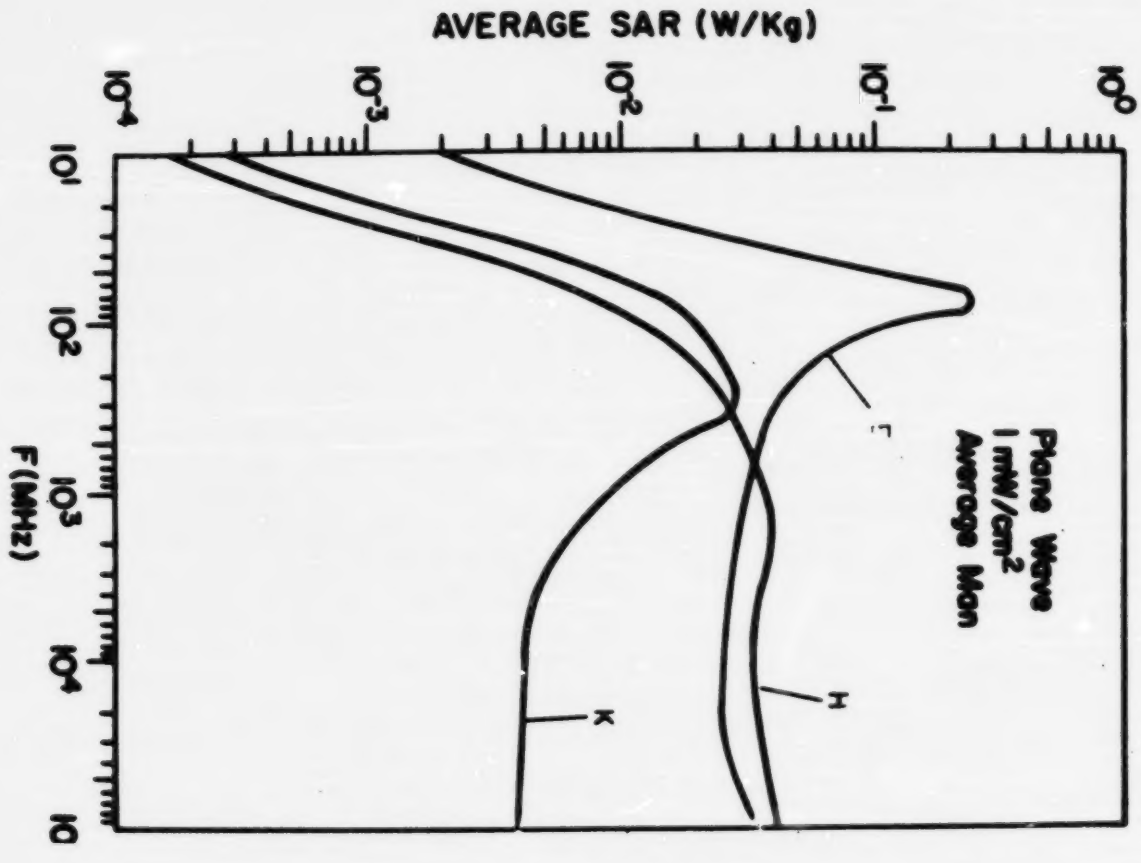
DEPENDS ON

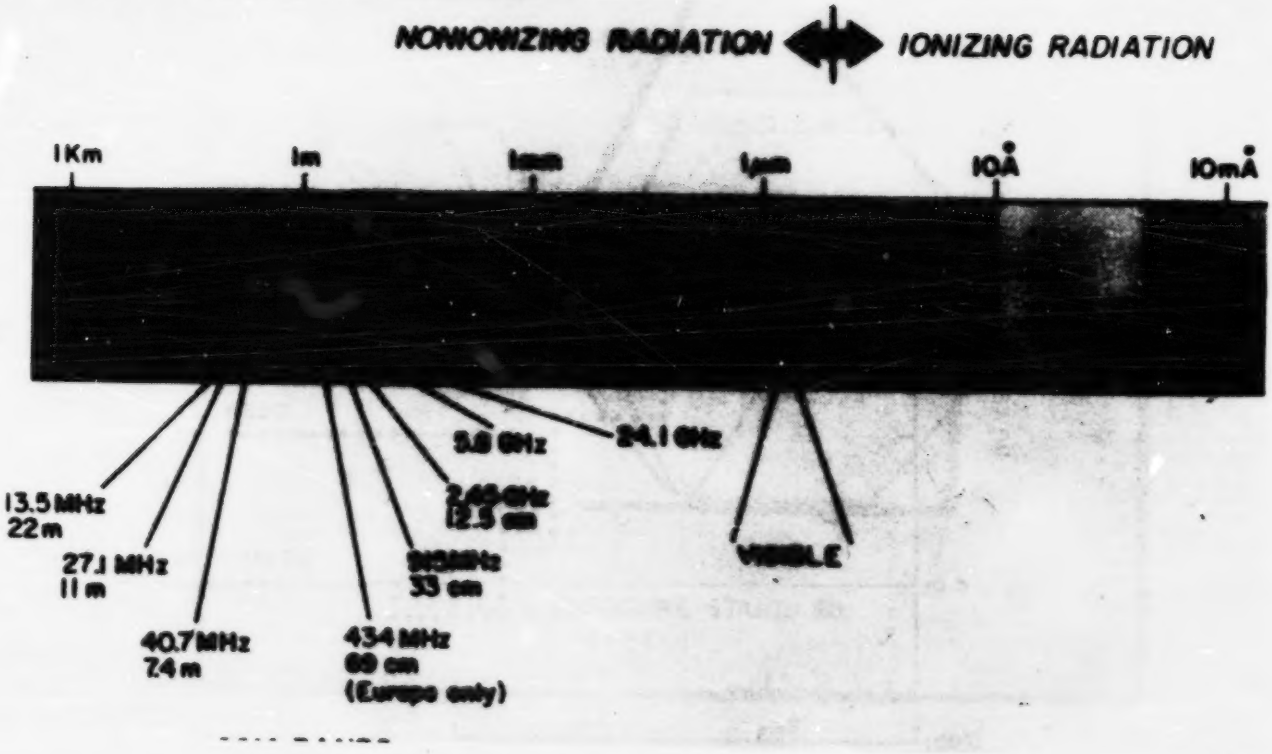
FIELD PARAMETERS	BIOLOGICAL SYSTEM
FREQUENCY	GEOMETRY (SIZE & SHAPE)
INTENSITY	DIELECTRIC PROPERTIES (DISTRIBUTION)
POLARIZATION	

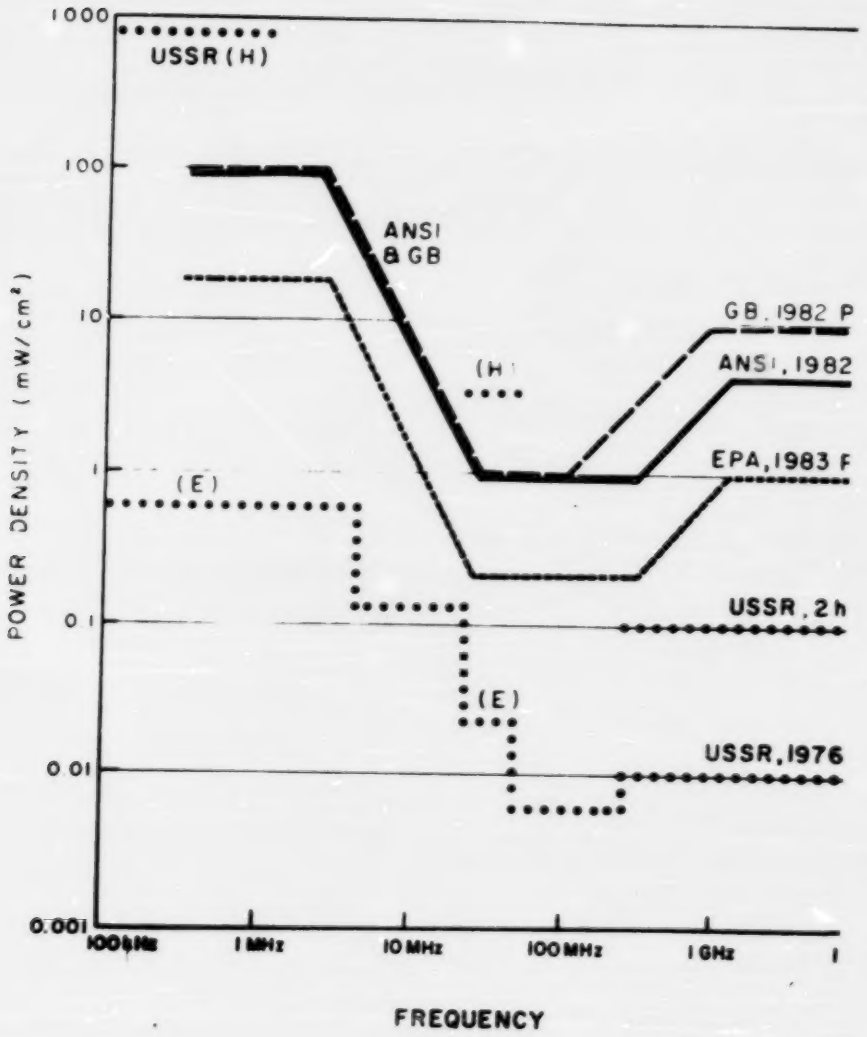
ENVIRONMENT

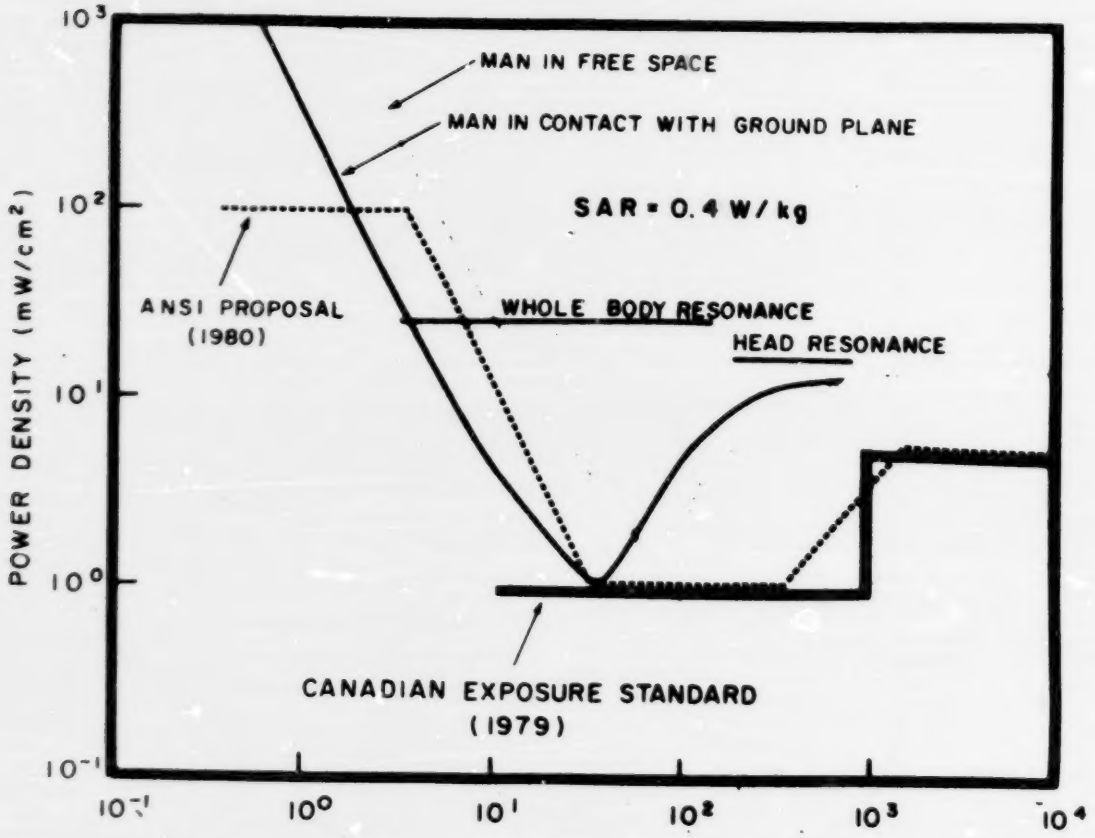
GROUND PLANE

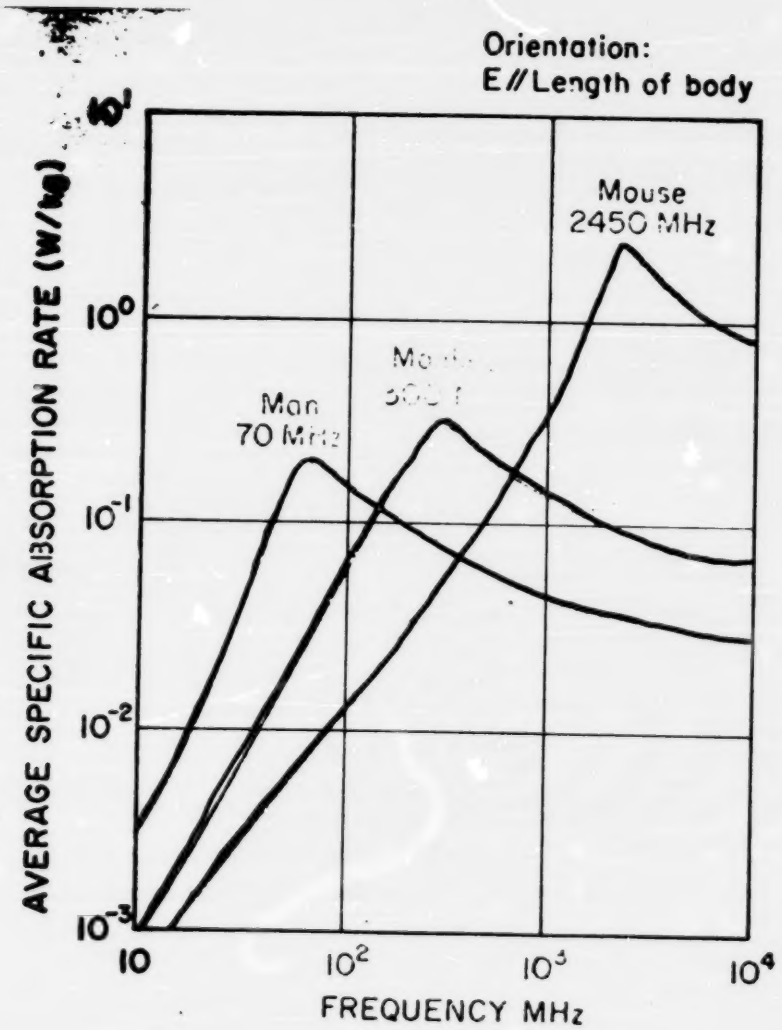
METAL & DIELECTRIC OBJECTS

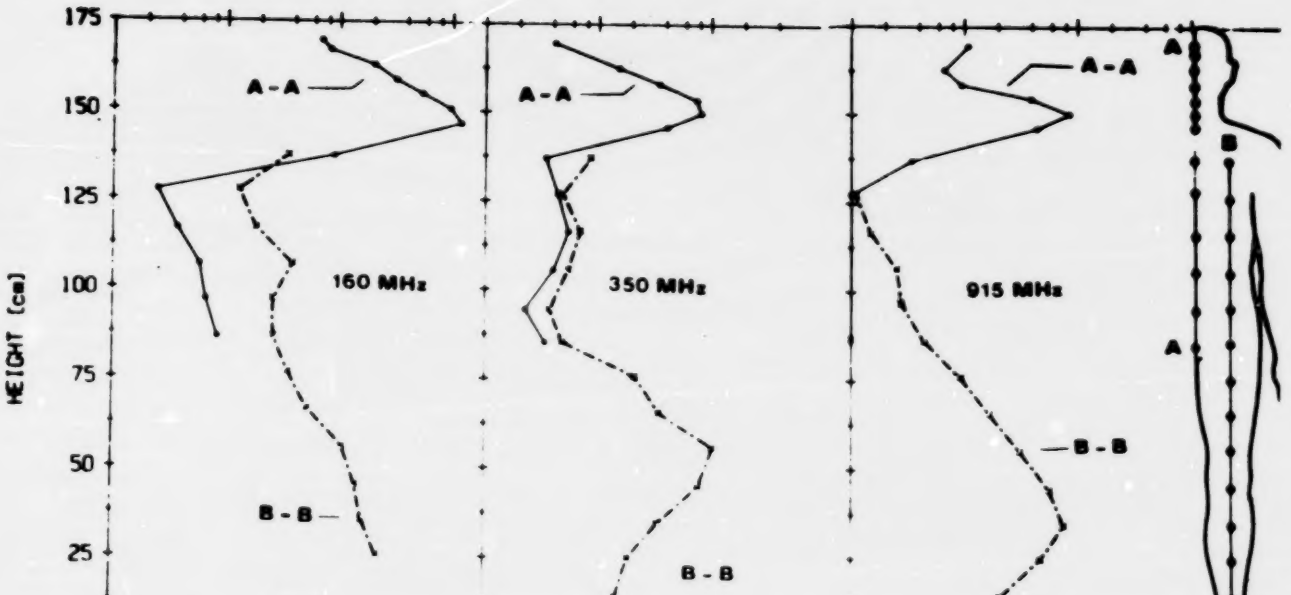

AVERAGE SAR (W/Kg)
10^{-4}
10^{-3}
10^{-2}
10^{-1}
10^{0}
10^{1}
10^{2}
10^{3}
10^{4}
10^{5}
F(MHz)
Plane Wave
1 mW/cm^2
Average Man
K
H


ELECTROMAGNETIC SPECTRUM
NONIONIZING RADIATION
IONIZING RADIATION
1Km
1m
1mm
1μm
10Å
10mÅ
13.5 MHz
22 m
27.1 MHz
11 m
40.7 MHz
7.4 m
434 MHz
69 cm
(Europe only)
5.8 GHz
24.1 GHz
2.45 GHz
12.5 cm
VISIBLE


1000
100
10
1
0.1
0.01
0.001
POWER DENSITY (mW/cm²)
USSR (H)
ANSI & GB
(H)
GB, 1982 P
ANSI, 1982
EPA, 1983 F
(E)
USSR, 2 h
(E)
USSR, 1976
100 kHz
1 MHz
10 MHz
100 MHz
1 GHz
FREQUENCY


MAN IN FREE SPACE
MAN IN CONTACT WITH GROUND PLANE
SAR = 0.4 W/kg
ANSI PROPOSAL
(1980)
WHOLE BODY RESONANCE
HEAD RESONANCE
CANADIAN EXPOSURE STANDARD
(1979)
POWER DENSITY (mW/cm²)
10³
10²
10¹
10⁰
10⁻¹
10⁻¹
10⁰
10¹
10²
10³
10⁴


Orientation:
E // Length of body
Mouse
2450 MHz
Man
70 MHz
AVERAGE SPECIFIC ABSORPTION RATE (W/kg)
10^0
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
10
10^2
10^3
10^4
FREQUENCY MHz


175
150
125
100
75
50
25
0
HEIGHT (cm)
A - A
B - B
160 MHz
350 MHz
915 MHz
1
10
100
1000
SAR (mW/Kg/mWcm-2)

M. Robert V. Decareau, Ph.D.

Laboratoire Natik

MICRO-ONDES: PERSPECTIVES DE DÉVELOPPEMENT

Les quelque vingt dernières années auront probablement constitué l'aube de l'ère du traitement par micro-ondes. On peut en effet affirmer que cette technologie n'en est qu'à ses débuts et qu'avec le temps un nombre croissant de procédés de l'industrie alimentaire reposeront dans une certaine mesure sur l'énergie thermique produite par micro-ondes. Cette tendance est irréversible non seulement dans l'industrie alimentaire, où les micro-ondes offrent la possiblité d'améliorer de façon marquée la qualité des aliments traités, mais aussi dans l'industrie chimique, où, selon un analyste (Smith, 1984), les perspectives de rendement financier sont encore plus encourageantes.

Pourquoi en sera-t-il ainsi? Pourquoi l'industrie devrait-elle se tourner vers les techniques de traitement par micro-ondes? Un examen de la situation actuelle nous permettra de mieux entrevoir l'avenir.

Une des principales raisons pouvant justifier l'adoption de cette technique est le fait que demain l'électricité constituera inévitablement la principale source d'énergie. Le caractère non renouvelable des énergies fossiles est d'ailleurs établi. De 1974 à 1984, l'utilisation de sources d'énergie primaire par l'industrie alimentaire a diminué de 15,2 p. 100 alors que l'utilisation de l'électricité a augmenté de 22,4 p. 100, et tout indique que cette tendance se maintiendra. La multiplication des centrales nucléaires dans le monde confirme d'ailleurs cette tendance et on peut également s'attendre à ce que l'énergie solaire prenne de plus en plus d'importance. Dans sa livraison de décembre 1970, le Journal of Microwave Power publiait une série d'excellents articles sur les centrales d'énergie solaire ayant recours aux satellites, et sur la transmission de cette énergie à la Terre par hyperfréquences.

Même si les générateurs d'hyperfréquences actuels ont un rendement de 50 à 60 p. 100 seulement, cette source d'énergie est utilisée beaucoup plus efficacement que ses concurrentes. Ce n'est donc pas pour des raisons d'ordre économiques que l'on hésite à faire accueil aux procédés reposant sur l'énergie des micro-ondes. L'obstacle viendrait plutôt, semble-t-il, de la résistance au changement. Mais ceux qui refusent de se tourner vers l'avenir risquent de s'apercevoir bientôt qu'ils ne sont plus dans la course.

Plusieurs facteurs économiques importants justifient l'adoption de cette technologie: économies d'espace, rendement plus élevé, qualité améliorée, efficacité énergétique accrue, meilleure ambiance de travail, réduction de la main-d'oeuvre et plus grande facilité d'entretien. Nous commenterons ces facteurs dans la description des procédés spécifiques. On trouvera par ailleurs au tableau 1 une liste des applications actuelles des micro-ondes au traitement des aliments.

Tempérage par micro-ondes

Le tempérage est le procédé par lequel un aliment congelé est amené à une température plus élevée, ne dépassant cependant pas le point de congélation. L'aliment reste ferme mais peut facilement être découpé, tranché, coupé en dés, haché ou subir d'autres transformations. L'énergie des micro-ondes permet de réduire le temps de traitement et, par conséquent, de réaliser une production supérieure dans un espace réduit. Ainsi, les méthodes traditionnelles de tempérage à température contrôlée exigent un espace suffisant pour 2 à 3 jours d'entreposage. Or, l'utilisation de l'équipement à micro-ondes permet d'abaisser cette capacité de plus de moitié; le tempérage se fait en quelques minutes et de façon continue, le produit étant amené à la température désirée au fur et à mesure des besoins. Les stocks à traiter peuvent être de l'ordre de quelques centaines de livres tout au plus, alors que dans un local traditionnel de tempérage, ils peuvent atteindre des dizaines de milliers de

livres. Le tempérage par micro-ondes permet donc de mieux planifier la production. En outre, on peut traiter une série de produits différents l'un après l'autre en modifiant légèrement la vitesse de la courroie transporteuse. Les micro-ondes permettent également de réduire les frais d'exploitation du local de tempérage et la main-d'oeuvre chargée de répartir les cartons de produits dans le local afin d'assurer les meilleurs résultats possible. Dans une exploitation importante, l'acheminement des produits de la chambre froide à l'unité de tempérage peut être entièrement automatisé, de la même manière que la manutention des stocks dans les entrepôts automatisés.

Les premières installations de tempérage par micro-ondes remontent au début des années 1970. Aujourd'hui, il en existe de par le monde plus de 200, dont la puissance varie de 25 kW à 150 kW. Une unité de tempérage type de 150 kW peut traiter 72,5 kg/kWh ou 10 886 kg/h. En prenant comme exemple du boeuf congelé en cartons de 27,2 kg, cela représente 400 cartons par heure. Une exploitation de tempérage traditionnelle équivalente nécessiterait, en admettant des quarts de travail de 8 heures, une superficie au moins deux fois plus grande que celle nécessaire pour l'entreposage en chambre froide, étant donné que les cartons doivent être espacés pour permettre une bonne circulation d'air. Et puisque le procédé classique nécessite au mieux 48 heures, il faudrait prévoir un espace pouvant contenir deux fois plus de produit, soit au moins 6 400 cartons. Même avec le meilleur matériel de manutention, cela constitue un travail considérable.

Le tempérage par micro-ondes n'entraîne aucune perte de poids, alors que le tempérage traditionnel entraîne une perte par exsudation atteignant souvent 5 p. 100. (Les exsudats de boeuf contiennent 10 p. 100 de protéines, et, selon certaines études, les pertes seraient à peu près semblables dans le cas des crevettes.) Comme il n'entraîne pas d'exsudation, le tempérage par micro-ondes est beaucoup plus propre et le matériel nécessite moins d'entretien. En outre, le produit, traité dans son emballage, n'entre pas en contact avec le matériel, ce qui simplifie le nettoyage. La manutention est également facilitée, puisque le produit s'extrait plus aisément de son emballage après le tempérage.

Le tempérage par micro-ondes permet d'obtenir un produit de meilleure qualité, étant donné qu'il n'y a pas de perte de saveur ou de couleur ni de croissance bactérienne.

Enfin, les installations à micro-ondes ont un rendement énergétique supérieur car elles n'utilisent que la quantité d'énergie nécessaire.

Cuisson par micro-ondes

À l'heure actuelle, le procédé de cuisson par micro-ondes le plus répandu est celui qui sert à la cuisson du bacon, et ce, en raison de la demande importante de bacon précuit dans le secteur de la restauration-minute. Les installations qui desservent ce marché représentent en efet une puissance totale de quelque 3 000 kW. La cuisson par micro-ondes

entraîne donc une consommation d'énergie considérable. Mais à la différence des procédés traditionnels, elle permet d'obtenir, en plus du bacon précuit, un sous-produit, soit du gras fondu de haute qualité, qui peut servir à l'aromatisation des aliments.

Par ailleurs, la cuisson du bacon par micro-ondes donne un meilleur rendement. En effet, le bacon cuit de façon plus égale et réduit moins que selon les procédés traditionnels, ce qui permet d'obtenir de 22 à 24 tranches comparativement à 16 à 18 tranches de bacon par livre, et un produit plus tendre. Pour une entreprise de restauration-minute importante, cela peut représenter une économie appréciable des frais de transport, puisque la quantité de bacon employée diminuera de 35 p. 100. Si l'on prend comme exemple une consommation mensuelle de quelque 272 160 kg de bacon brut, une réduction de 25 à 35 p. 100 peut représenter des économies de 40 000$ par mois.

Un autre avantage des micro-ondes est la quasi-absence de nitrosamine puisque la température de cuisson est inférieure à 275°F.

Par ailleurs, il ne faut pas négliger le caractère pratique de ce procédé pour le consommateur. En effet, le procédé de cuisson du bacon par micro-ondes peut maintenant viser le lucratif marché de la consommation de masse. Les premières tentatives en ce sens ont échoué pour diverses raisons. Le consommateur ne considérait pas le bacon précuit comme un bon achat. De plus, notre mode de vie à l'époque ne nous

portait pas encore à favoriser la consommation d'aliments à préparation rapide comme c'est le cas aujourd'hui. Maintenant que la moitié des foyers américains possèdent des fours à micro-ondes, le bacon précuit, de réchauffage facile, convient plus à notre mode de vie et peut davantage susciter l'intérêt du consommateur. Comme la consommation annuelle de bacon s'élève à quelque 13 636 363 kg, même un modeste marché de détail pour la bacon précuit peut constituer un créneau intéressant pour le matériel de cuisson du bacon par micro-ondes.

La cuisson par micro-ondes permet d'obtenir des résultats supérieurs à ceux obtenus par les procédés traditionnels en ce qu'elle provoque une dégradation thermique moindre du produit. Le traitement mixte est presque isotherme, c'est-à-dire que le gradient de température est d'environ zéro. Lorsqu'on n'est pas contraint de cuire à l'excès la partie externe d'un aliment afin d'obtenir une cuisson interne adéquate, on obtient une meilleure rétention des éléments nutritifs. Or, une utilisation plus efficace de l'énergie se traduit par des factures moins élevées à ce chapitre.

Un des principaux facteurs du succès de la cuisson par micro-ondes des morceaux de poulet consiste dans le rendement accru qu'elle permet. Dans ce procédé, les micro-ondes combinés à la vapeur saturée donnent de meilleurs résultats que l'utilisation d'une seule de ces sources énergétiques. Ce procédé mixte a permis de réduire considérablement le temps de cuisson, le ramenant entre 14 et 16 minutes, comparativement à près d'une heure pour la cuisson à la vapeur.

En outre, le fait qu'il s'agit d'un procédé continu rend possibles des économies importantes au plan de la main-d'oeuvre.

Séchage par micro-ondes

La première grande application du séchage par micro-ondes a été le séchage final des croustilles. Même si elle s'est révélée un échec, cette application a quand même permis de démontrer qu'il est à la fois possible et pratique d'utiliser des systèmes à micro-ondes industriels. On comptait à un certain moment de 25 à 30 installations de ce type pour le séchage final des croustilles dans l'ensemble des pays suivants: États-Unis, Canada, Royaume-Uni, Suède et, possiblement, le reste du monde. Un article de Jay O'Meara, publié dans le Journal of Microwave Power (O'Meara, 1973) dresse l'historique de ce procédé.

Le séchage des pâtes constitue un exemple typique d'une application où l'on remplace les systèmes classiques par des systèmes à micro-ondes. L'installation d'un système classique est en effet difficilement justifiable quand on sait que le système à micro-ondes peut produire de 3 à 4 fois plus de produit dans le même espace, qu'il donne un produit de meilleure qualité à un coût moins élevé et qu'il nécessite moins de main-d'oeuvre. En effet, l'installation d'un système à micro-ondes requiert environ 1 000 heures-personnes, comparativement à celle d'un système traditionnel, qui requiert 6 à 8 000 heures-personnes. Les premiers séchoirs de pâtes à

micro-ondes ont été installés au début des années 1970. Aujourd'hui, on en compte environ 27 en exploitation. L'un des premiers, sinon le premier, fut installé en 1971 à Bramalea, en Ontario, par la société T.J. Lipton.

Le procédé se résume ainsi: les pâtes tréfilées sont introduites dans la section de séchage à air chaud à une humidité nominale de 30 p. 100, laquelle est ramenée à environ 23 p. 100 en moins d'une minute. Le séchage se poursuit durant environ 35 minutes à une humidité relative de 18 p. 100. Le produit est ensuite transporté à la section micro-ondes et air chaud, dans laquelle l'humidité est abaissée à un niveau de 13 à 13,5 p. 100 en l'espace d'environ 12 minutes. Dans cette section, la température de l'air est de 82 °C, l'humidité relative de 15 à 20 p. 100, et le débit d'air de 100 pi/mn. La puissance des micro-ondes est d'environ 30 kW à 915 MHz.

La dernière étape du séchage s'effectue sans chaleur ni circulation d'air; toutefois, l'humidité relative est maintenue entre 70 et 80 p. 100 afin d'arrêter le séchage et de permettre aux gradients de température de s'égaliser et au produit de se refroidir. Le temps de séchage dans cette section est d'environ 1 heure et le produit y perd un autre 0,5 à 1 p. 100 d'humidité, les micro-ondes comptant pour environ 10 p. 100 de l'énergie nécessaire pour cette opération.

Parmi les autres applications du séchage par micro-ondes, mentionnons la déshydratation des oignons, le séchage du riz sauvage, des gâteaux de riz, des gâteaux au lait, des oeufs,

des nouilles, des friandises et de la poudre de chocolat. Le Japon met en pratique certaines de ces applications depuis près de 10 ans. Au Canada et en Europe, on a monté plusieurs systèmes de 80 kW pour la production de chapelure utilisée dans les enrobages assaisonnés.

Au milieu des années 1960, on a conçu un système à micro-ondes pour le séchage du tanoak, bois servant à la fabrication des bâtons de baseball. Plus récemment, un système de 25 kW pour le séchage du bouleau et du pin a été mis en service dans le nord de la Finlande. En Chine continentale (Chen et al., 1982), on fait état de l'utilisation de systèmes à micro-ondes pour le séchage du bois et on en mentionne les avantages par rapport aux procédés traditionnels sur le plan du temps, de la qualité et du rendement. Les systèmes à micro-ondes semblent particulièrement utiles pour le séchage des bois de première qualité. Le bois séché par micro-ondes est en effet presque totalement exempt de voilure et de fentes. On signale des pertes de seulement 2 p. 100 dans le cas du traitement par micro-ondes, comparativement à 22 p. 100 pour le traitement à la vapeur. La Chine utilise également les micro-ondes pour le séchage du papier (réduction de 20 p. 100 du temps de séchage et économie d'électricité de 50 p. 100), des herbes, des bois pharmaceutiques, du ruban magnétique, du tabac, du cuir et des fibres chimiques.

Lyophilisation par micro-ondes

Même si les micro-ondes ne comptent que pour une faible partie du procédé de lyophilisation, elles permettent des économies de temps considérables. Si les prototypes d'aujourd'hui intègrent les micro-ondes dans le procédé de dessiccation par congélation traditionnelle, c'est que l'on reconnaît que le procédé classique est assez efficace pour éliminer une partie importante de l'humidité du produit. On prévoit aussi la possibilité d'ajouter un système à micro-ondes aux chambres de séchage traditionnelles déjà en place, et ce, à un coût modique par rapport à celui d'un renouvellement complet du matériel.

L'utilisation du procédé mixte permet d'appliquer l'énergie des micro-ondes au moment où le séchage commence à ralentir et que le procédé classique commence à perdre de son efficacité en raison de la faible conductibilité de la couche sèche qui entoure le coeur du produit. Ce problème ne se pose pas dans la lyophilisation par micro-ondes. De plus, la quantité relativement peu élevée d'humidité résiduelle fait que l'opération requiert une puissance énergétique relativement faible.

L'abaissement des coûts du procédé pourrait modifier considérablement le marché des aliments lyophilisés et accroître de façon importante le nombre de produits contenant des éléments lyophilisés. Des travaux en cours concernant des aliments lyophilisés comprimés pouvant être utilisés dans les rations militaires, où la légèreté, la qualité et l'encom-

brement réduit constituent des facteurs importants, pourraient d'ailleurs contribuer au développement de ce marché. En plus des soupes déshydratées en portions individuelles, si populaires aujourd'hui, on pourrait retrouver une variété d'aliments tels les entrées, salades, fruits et légumes, plats cuisinés et desserts. Le caractère compact de ces aliments pourrait amener la naissance d'un marché où la vente se fera par distributeurs automatiques.

Les micro-ondes en boulangerie

Les premiers travaux portant sur l'utilisation des micro-ondes en boulangerie ont été exécutés par l'équipe de H. Fetty (1966) à la Litton Industries dans le cadre du développement d'une boulangerie mobile destinée à l'armée américaine. On avait alors constaté qu'il était possible de cuire du pain selon ce procédé dans des moules métalliques ordinaires, à condition que la pâte ait au préalable commencé à lever.

D'autres travaux ont également été réalisés en Grande-Bretagne, à la Flour Milling and Bakery Research Association, à Chorleywood. On a constaté que la pâte faite avec de la farine à faible teneur protéique, qui est utilisée de façon courante au Royaume-Uni, pouvait facilement être cuite dans un four à micro-ondes à haute température (Chamberlain, 1973). Pour la Grande-Bretagne, cette réussite signifiait la possibilité de désormais ne plus devoir importer de farine à haute teneur protéique.

Le nombre de brevets récemment accordés pour des systèmes de cuisson par micro-ondes dans des moules en métal indique un regain d'activité dans ce domaine (Schiffmann et al. 1981, 1982; Pei, 1982). Pei signale également l'adaptation de systèmes à micro-ondes à des fours traditionnels, permettant des économies de temps de l'ordre de 60 p. 100 par rapport à la cuisson ordinaire. Pour une même production, une telle économie de temps peut se traduire en une réduction considérable de l'espace nécessaire.

Dans le cas des micro-ondes, la quantité d'énergie nécessaire est beaucoup plus proche de la quantité théorique qu'elle ne l'est dans les procédés classiques, qui occasionnent beaucoup de pertes thermiques. Le rendement énergétique des systèmes à micro-ondes est beaucoup plus élevé, surtout si l'on utilise des moules métalliques. En effet, avec ce genre de moules, aucune énergie n'est perdue à surchauffer la partie extérieure du pain, alors qu'avec des moules transparents, les côtés et le dessous seraient beaucoup trop cuits.

Fetty (1966) signale des pertes de quelques points de pourcentage moins élevées dans le cas de la cuisson par micro-ondes. On remarque également une meilleure rétention de la saveur en raison, croit-on, d'une température de cuisson plus basse. L'abaissement du temps de cuisson et de la durée de l'exposition de la surface du pain à des températures élevées réduit les pertes en lysine aminoacide (Tsen et al., 1977).

La cuisson par micro-ondes est susceptible de donner une nouvelle image à la boulangerie. Un établissement bien conçu pourrait traiter une grande variété de produits en réglant la puissance en micro-ondes au degré approprié, suivant le produit. On pourrait donc cuire à la suite l'un de l'autre le pain, les petits pains, les gâteaux et d'autres produits. Les installations de production pourraient être situées beaucoup plus près des secteurs qu'elles desservent, ce qui réduirait considérablement les frais de transport. La cuisson de pains spéciaux pourrait se faire à plus longs intervalles; ces pains seraient tranchés et emballés pour être ensuite pasteurisés par micro-ondes, entreposés pour une courte période et livrés avec les autres produits.

Pasteurisation par micro-ondes

Les premières études relatives à l'application de l'énergie des radiofréquences à la pasteurisation remontent à 1946 (Cathcart, 1946), année où l'on a démontré la faisabilité de la pasteurisation du pain dans son emballage. Olsen (1965) signale la pasteurisation par micro-ondes de petits pains "brown and serve" (Evans et Taylor, 1967), la pasteurisation à grande échelle de gâteaux emballés. C'est en Suède (Bengtsson et Ohlsson, 1974) que l'on a fait la première utilisation à grande échelle des micro-ondes pour la pasteurisation des pains spéciaux tranchés. Par la suite, on a construit plusieurs installations semblables en Allemagne, en Suisse, en Suède et au Danemark. L'installation suisse utilisait 80 kW, 2 450 MHz, et traitait 2 000 kg à l'heure à

une température de 20 à 80°C. Une exposition de 1 à 2 minutes permettait d'augmenter la durée de conservation de 2 à 3 mois. Avec les micro-ondes, nul besoin d'inhibiteurs chimiques de moisissure. Enfin, on a montré que la pasteurisation par micro-ondes de la bière, du vin et du lait était possible et en 1977, à Carlsruhe, en Allemagne de l'Ouest, on a mis en marché un procédé de pasteurisation du yogourt dans son contenant final.

Stérilisation par micro-ondes

La stérilisation par micro-ondes des aliments dans des sachets de plastique a fait son entrée à la fin des années 1960, lorsque Kenyon (1971) a modifié un four à micro-ondes de 10 kW, 2 450 MHz muni d'une courroie transporteuse, en y ajoutant une chambre pressurisée, de façon à permettre une stérilisation de très courte durée à haute température. En 1974, la société suédoise Alfa Laval AB s'est vu accorder des brevets pour un procédé semblable (Stenstrom, 1974 a,b,c). En 1983, cette même société annonçait (Anon, 1983) son association avec Akerland and Rausing, une entreprise d'emballage, dans le but de commercialiser le procédé de stérilisation par micro-ondes.

Perspectives de dévelopement

Déjà, au sein des fabricants d'aliments, on se rend compte de plus en plus que les consommateurs font bon accueil au

principe de la cuisson par micro-ondes. Dans un avenir rapproché, on trouvera vraisemblablement un four à micro-ondes dans presque tous les foyers, ce qui créera un marché pour les portions alimentaires individuelles emballées pouvant être placées directement dans ces fours. Puisque ces produits seront dans des emballages adaptés aux micro-ondes, on peut logiquement prévoir que l'énergie des micro-ondes servira à les produire. La haute qualité des aliments stérilisés par micro-ondes a d'ailleurs été démontrée. Aujourd'hui, les matériaux isolants dont sont fabriqués les contenants permettent une durée de conservation acceptable. On peut s'attendre, dans un avenir assez rapproché, à voir sur les étalages des super-marchés une vaste gamme d'aliments emballés en portions individuelles pouvant être conservés longtemps et chauffés aux micro-ondes.

"L'utilisation de l'énergie des micro-ondes pour protéger les récoltes de fruits et de légumes contre les gelées du printemps ou de l'automne est plus qu'une vague possibilité. Il suffit de quelques degrés de chaleur pour faire la différence entre des pertes s'élevant à des millions de dollars et des pertes mineures" (Decareau, 1985). Des essais exécutés au Canada ont démontré qu'à peine quelques milliwatts d'énergie par centimètre carré de surface suffisent pour protéger la plupart des végétaux (Bosisio et Bathakur, 1969; Bosisio et al., 1970).

D'importantes recherches ont été effectuées au Canada et aux États-Unis sur le séchage par micro-ondes et la désinsectisation du grain et des semences. Des études en ce domaine

ont débuté durant les années 1960 à l'université du Manitoba, sous la direction de M.A.K. Hamid. Un système de déshydratation sous vide par micro-ondes du grain et des semences a été mis au point par la société McDonnell Douglas et a mené à la conception d'une installation de 150 kW, 915 MHz. Même si on a peu entendu parler des progrès réalisés dans ce domaine au cours des dernières années, il existe un potentiel pour cette technologie.

Il est par ailleurs possible qu'un certain nombre d'autres hyperfréquences puissent être utilisées à des fins industrielles, scientifiques et médicales. En 1976, (Anon, 1976), l'International Microwave Power Institute a présenté un mémoire lors de la Conférence administrative mondiale de radiocommunications de 1979 de l'Union internationale des télécommunications, dans lequel il propose que les fréquences de 4 900, 9 800, 55 000, 120 000 et 248 000 MHz soient assignées à ces fins.

Les fréquences de 4 900 MHz et 9 800 MHz ont été demandées en raison du fait qu'elles sont des harmoniques de la fréquence de 2 450 MHz et qu'elles pourraient servir dans la mise au point de fours à micro-ondes. Les trois fréquences plus élevées ont été demandées pour certaines applications commerciales, telles le chauffage de petites fibres et de produits se présentant sous forme de boulettes, la désinsectisation et tout un éventail d'applications biologiques basées sur les effets spécifiques prouvés des hyperfréquences. Certaines applications, tels le désherbage et la désinsectisation des champs, comporteraient une importante quantité

de rayonnement libre. Mais dans certains cas, le rayonnement libre sera considéré non pas comme un agent de pollution mais comme le prix qu'il faut payer pour réaliser d'importants objectifs tout en réduisant au minimum les polluants plus sérieux, comme les herbicides et les insecticides chimiques.

L'industrie alimentaire ne devrait pas dédaigner la technologie des micro-ondes sous le prétexte erroné qu'elle est trop complexe, qu'elle occasionne des problèmes d'entretien et qu'elle est trop coûteuse. L'énergie des micro-ondes existe déjà sous forme d'unités autonomes d'alimentation et s'applique à presque tous les procédés nécessitant de la chaleur. Il existe aussi des unités de recherche et des équipements expérimentaux permettant l'évaluation de prototypes ou l'adaptation des micro-ondes à des procédés existants.

L'énergie des micro-ondes est très facile à régler, beaucoup plus en fait que toute autre forme de chaleur; il suffit d'en modifier légèrement la puissance ou de changer la vitesse de la courroie transporteuse. Il existe un grand nombre de données relatives à la modélisation mathématique du transfert de la chaleur dans le cas des micro-ondes et des procédés mixtes. On dispose aussi d'une quantité importante d'informations sur les propriétés diélectriques des aliments et d'autres matériaux, qui peuvent servir pour la modélisation d'un procédé.

TABLEAU 1

Application des micro-ondes à la transformation des aliments

Procédé	Produit
Décongélation	Viande, poisson, volaille
Cuisson	Bacon, petits pâtés de viande, saucisses, pommes de terre, sardines, poulet
Séchage	Pâtes, oignons, lait, gâteaux de riz, jaune d'oeuf, herbes, algues, friandises, poudre de chocolat
Déshydratation sous vide	Jus d'orange, grains, semences
Lyophilisation	Viande, légumes, fruits
Pasteurisation	Pain, yogourt
Stérilisation	Aliments en sachets
Boulangerie	Pain, muffins anglais
Rôtissage	Grains de café, noix, grains de cacao
Blanchiment	Maïs, pommes de terre, fruits
Dégraissage	Saindoux, suif
Fermentation	Vins et spiritueux

Références bibliographiques

Anon (1977), Proposed IMPI position paper on frequency allocation matters, Microwave Energy Appl. Newsl, 9 (6), 15-16.

Anon (1980), Sterilization, the potential of Bach, Food Manuf., 35 (10), 53.

Anon (1983), Multitherm unveiled, Food Manuf., 58 (12), 23-24.

Bengtsson, N.E. et Ohlsson, T. (1974), Microwave heating in the food industry, Proc. IEEE, 62 (1), 44-55.

Bosisio, R.G. et Barthakur, N. (1969), Protection of plants from the cold, J. Microwave Power, 4 (3), 190-193.

Bosisio, R.G., Barthakur, N. et Spooner, J. (1970), Microwave protection of a field crop agains cold, J. Microwave Power, 5 (1), 47-52.

Cathcart, W.H. (1946), High-frequency heating produces mold-free bread, Food Ind., 18 (6), 864-865.

Chamberlain, N. (1973), Microwave energy in the baking of bread, Food Trade Rev., 43 (9), 8-12.

Chen, H-K., Shen, Z-Y., Fu, C-S. et Wu, D. (1982), The development of microwave power applications in China, J. Microwave Power, 17 (1), 11-15.

Decareau, R.V. (1983), Microwave Food processing: Today and tomorrow, Activities Report, 35 (1), 41-49.

Decareau, R.V. (1985), Microwaves in the Food Processing Industry, Academic Press, New York.

Kase, Y. et Ogura, K. (1978), Microwave power applications in Japan, J. Microwave Power, 13 (2), 115-123.

Kenyon, E.M., Westcott, D.E., LaCasse, P. et Gould, J. (1970), A system for the continuous processing of food pouches using microwave energy, J. Food Sci, 36 (2), 289-293.

Olsen, C.M. (1965), Microwaves inhibit bread-mold, Food Eng., 37, 51-53.

O'Meara, J.P. (1973), Why did they fail? A backward look at microwave applications in the food industry, J. Microwave Power, 8 (2), 167-172.

Pei, D.C.T. (1982), Microwave baking - new developments, Baker's Dig., 56 (1), 8, 10, 32.

Schiffmann, R.F., Mirman, A.H. et Grillo, R.J. (1981), Microwave proofing and baking bread utilizing metal pans, U.S. Patent 4,271,202.

Schiffmann, R.F., Mirman, A.H. et Grillo, R.J. (1982), Method of baking firm bread, U.S. Patent 4,318,931.

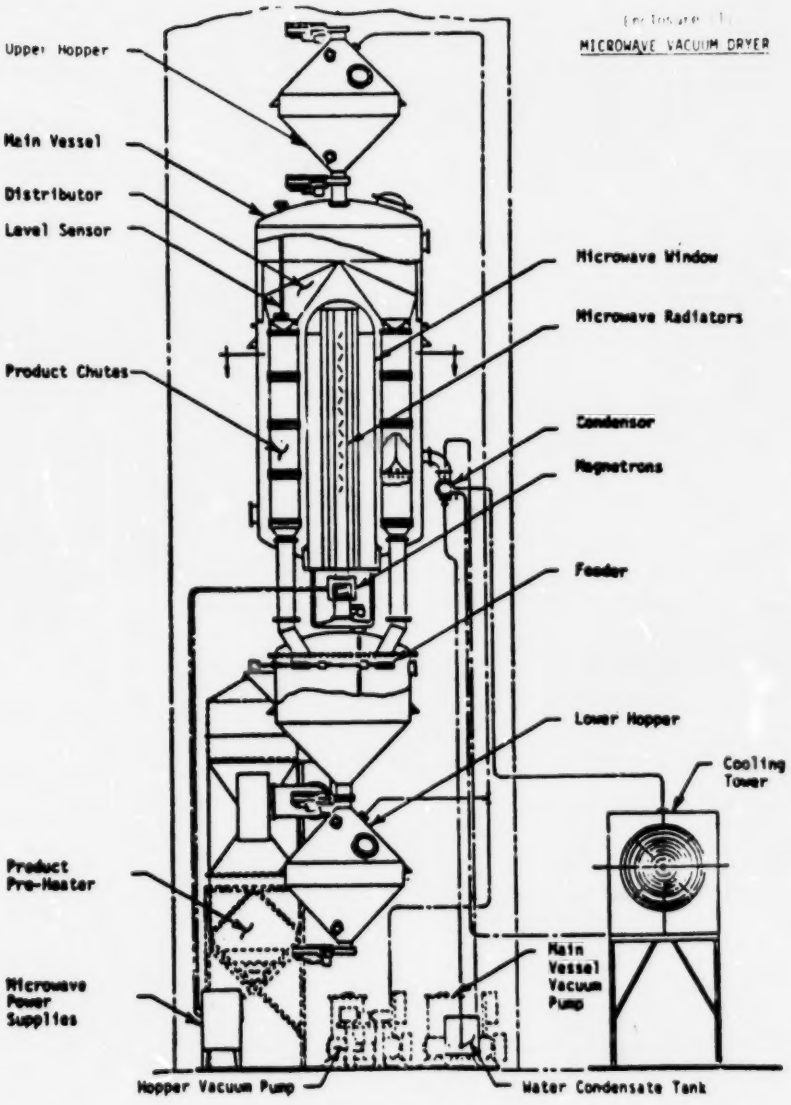
Smith, R.D. (1984), Microwave Power in Industry, Electric Power Research Institute, 3412 Hillside Ave., Palo Alto, CA 94303.

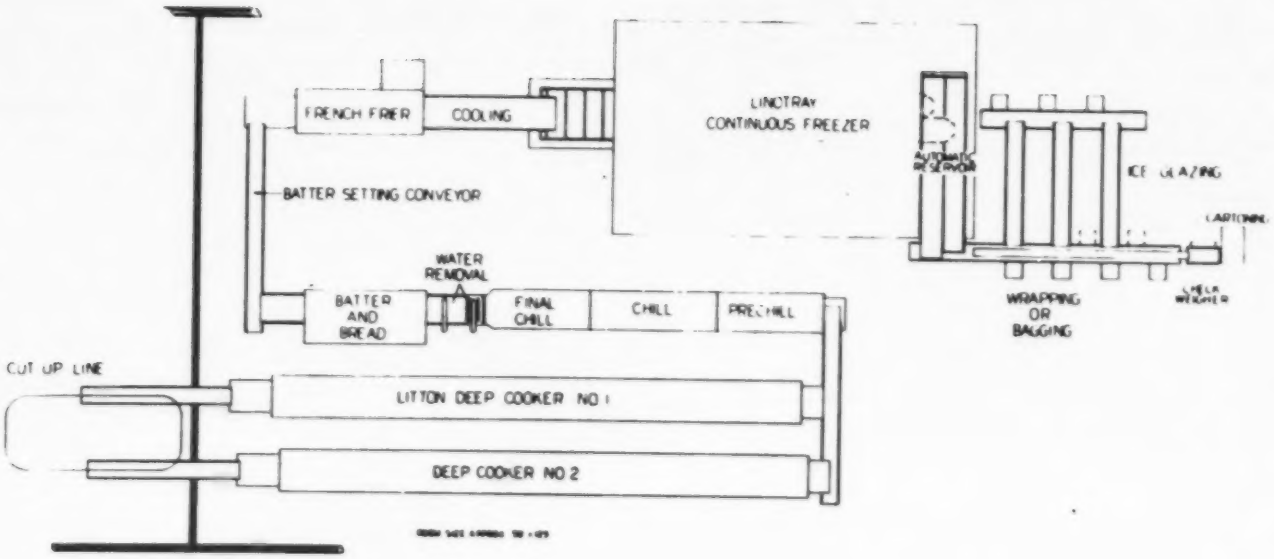
Stenstrom, L.A. (1974a), Method and apparatus for heating heat sensitive products, U.S. Patent 3,809,844.

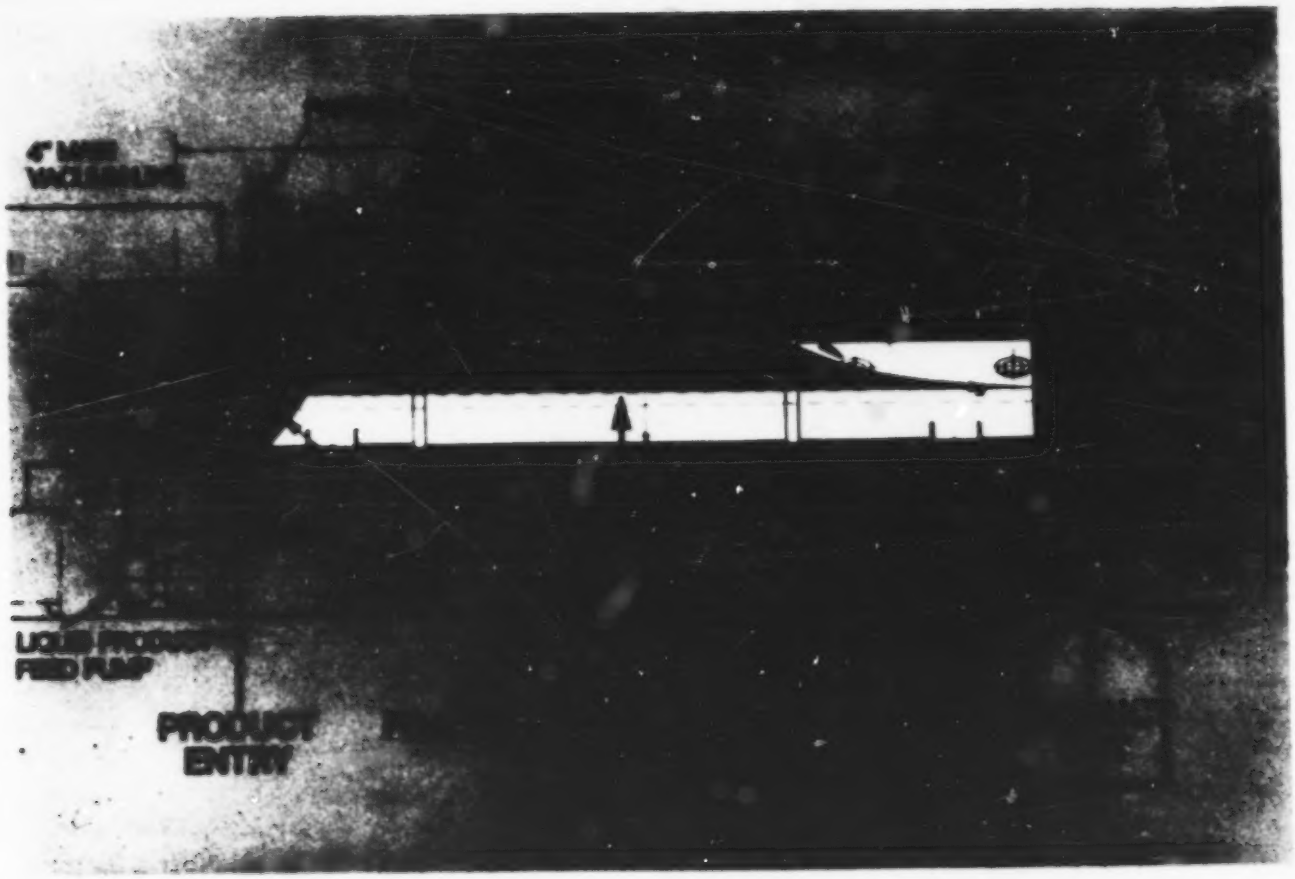
_____(1974b), Heating of products in electro-magnetic field, U.S. Patent 3,809,845.

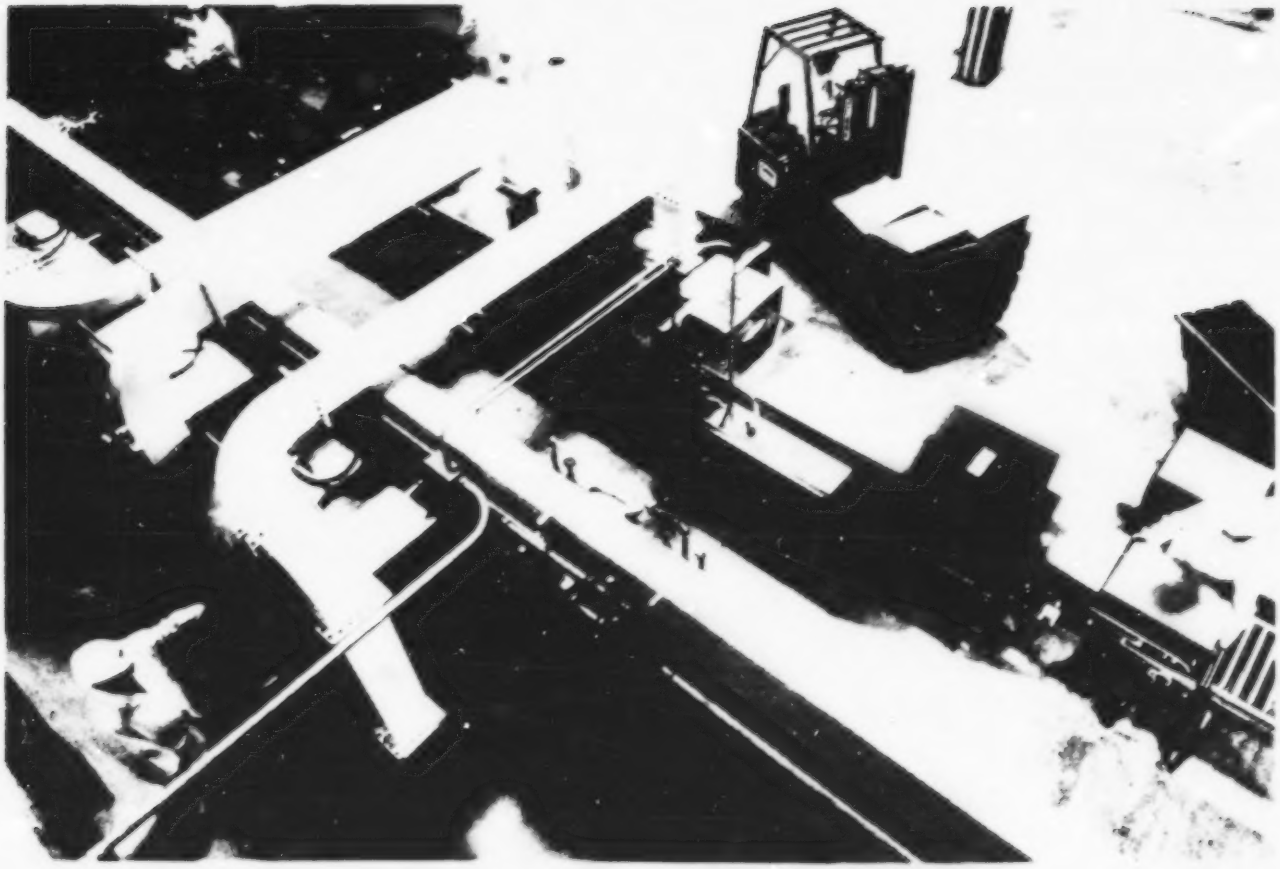
_____(1974c), Heat treatment of heat sensitive products, U.S. Patent 3,814,889.

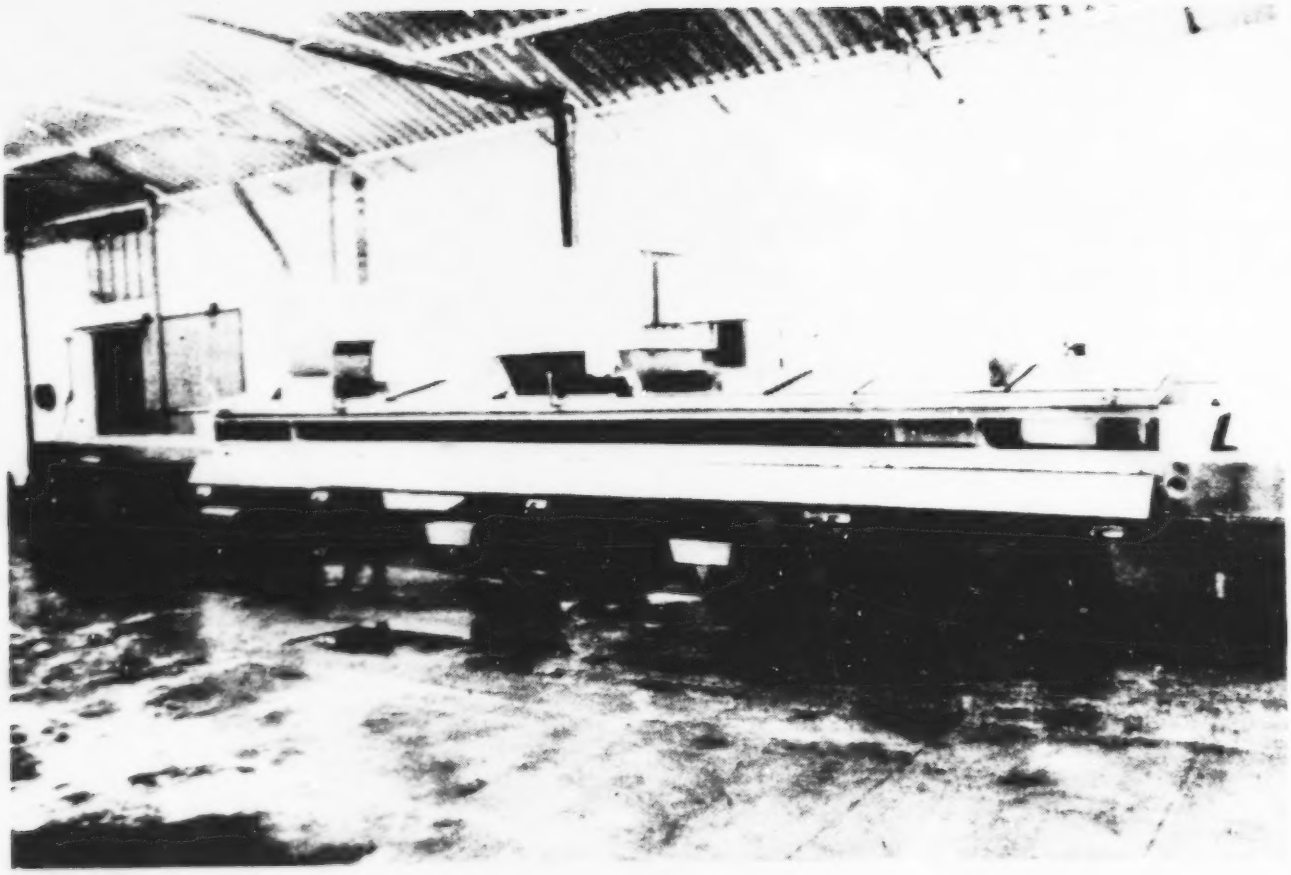
Tsen, C.C., Reddy, P.R.K. et Gehrke, C.W. (1977), Effects of conventional baking, microwave baking and steaming on the nutritive value of regular and fortified bread, J. Food Sci., 42, 402-406.

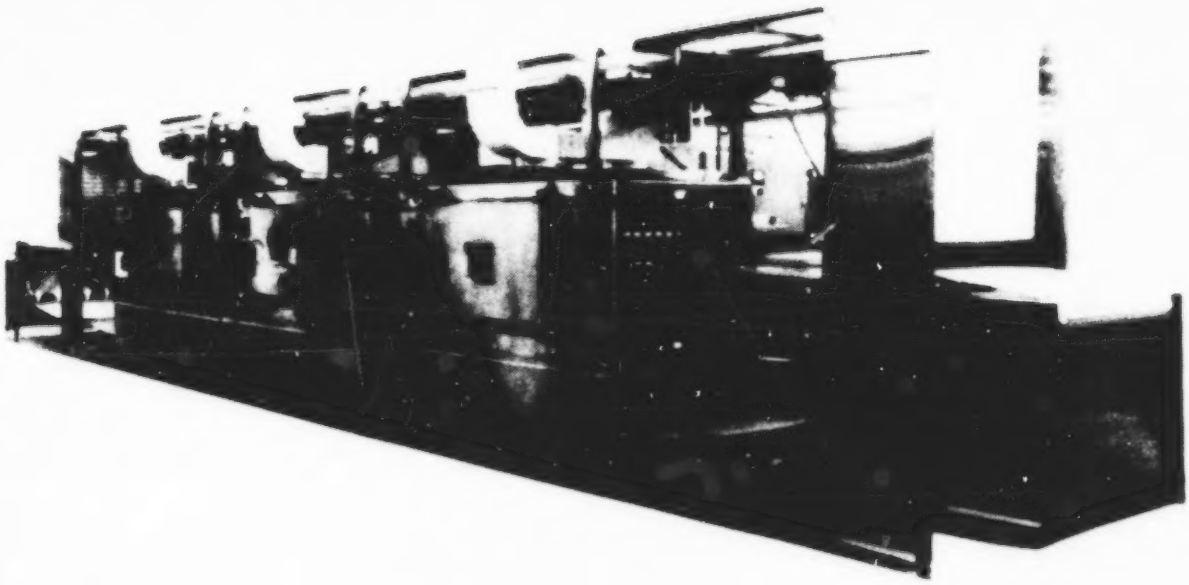

MICROWAVE VACUUM DRYER
Upper Hopper
Main Vessel
Distributor
Level Sensor
Product Chutes
Microwave Window
Microwave Radiators
Condensor
Magnetrons
Feeder
Lower Hopper
Cooling Tower
Product Pre-Heater
Microwave Power Supplies
Main Vessel Vacuum Pump
Hopper Vacuum Pump
Water Condensate Tank


FRENCH FRIER
COOLING
LINCTRAY
CONTINUOUS FREEZER
BATTER SETTING CONVEYOR
ICE GLAZING
WATER
REMOVAL
BATTER
AND
BREAD
FINAL
CHILL
CHILL
PRECHILL
WRAPPING
OR
BAGGING
CUT UP LINE
LITTON DEEP COOKER NO 1
DEEP COOKER NO 2


FEED PUMP
PRODUCT
ENTRY







APPLICATIONS OF DIELECTRIC HEATING IN THE FOOD FIELD ON AN INDUSTRIAL (I) OR PILOT PLANT (P) SCALE USING HIGH FREQUENCY (HF) MICROWAVE (MW) HEATING

PROCESS	PRODUCTS	HF	MW
THAWING-TEMPERING	MEAT, FISH, BERRIES, ETC.	I	I
COOKING-EXTRUDING	MINCED MEATS	-	PI?
COOKING	CHICKEN, BACON, MEAT PATTIES, FISH, POTATOES	-	I
RENDERING	LARD AND TALLOW	P	I?
BLANCHING	CORN ON THE COB, POTATO, FRUITS	P	P
PASTEURIZATION	YOGURT	HF+MW(I)	
	BREAD	-	I
	PRECOOKED FOODS, SHRIMP	-	P
STERILIZATION	POUCH PACKED FOODS	-	P
FINISH DRYING	PASTA, ONIONS, POTATO CHIPS	-	I
	SUGAR CUBES	I	
VACUUM DRYING	FRUIT JUICE CONCENTRATES	-	I
BAKING	DOUGHNUT PROOFING	I	I
	FINISH BAKING COOKIES, ETC.	I	I?
	DOUGHNUT FRYING	-	I
	BREAD	P	P
ROASTING	PEANUTS, COFFEE, COCOA	P	P

ADAPED FROM BENGTSSON & OHLSSON (1980).

COMMANDITAIRE

Le C.D.A.Q. et le comité d'organisation du colloque apprécient la générosité de la compagnie:

- A. LASSONDE & FILS INC.

Au nom du comité d'orgenisation et de tous les participants à cette journée d'activité, nous la prions d'agréer nos plus sincères remerciements.

REMERCIEMENTS

Les autorités du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, le Conseil des denrées alimentaires du Québec et le Comité d'organisation désirent témoigner aux participants, aux conférenciers, aux personnes-ressources, aux commanditaires et aux médias d'information leur plus vive appréciation pour leur dévouement, leur contribution et leur aide à la réussite de cet événement.

Abdesslam Guerch
Secrétaire du Conseil
des denrées alimentaires
du Québec

En cas de non-livraison — Port de retour garanti

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE,
DES PÊCHERIES ET DE L'ALIMENTATION
DU QUÉBEC
200-A, CHEMIN SAINTE-FOY
QUÉBEC G1R 4X6

Canada Post / Postes Canada

Book rate / Tarif des livres
Permis 3963
Québec, Qué.

Gouvernement du Québec
Ministère de l'Agriculture,
des Pêcheries et de l'Alimentation